

Title	視認性に基づく避難経路の設計手法に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	秋月, 有紀
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2012-03-26
URL	<a href="http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r12642">http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r12642</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

博士論文

視認性に基づく避難経路の設計手法に関する研究

2012 年 1 月

秋月 有紀

## 目 次

### 第1章 序論

1-1. 研究の背景	1
1-2. 既往の関連研究と残された課題	2
1-2-1. 経路探索と視野情報	2
1-2-2. 避難行動と避難経路の照明状態の関係	2
1-2-3. 火災環境下での視認性と避難行動	4
1-2-4. 避難安全検証法	6
1-2-5. 二層ゾーン建物内煙流動モデル	6
1-3. 研究の目的	7
1-4. 本論文の構成	7

### 第一部 日常の建築都市空間における避難経路の視環境設計

#### 第2章 避難経路探索のし易さに基づくサイン配置の評価法

2-1. はじめに	11
2-2. 立体角投射率を用いたサイン設置状況の把握	12
2-2-1. 識別し易さに基づく避難経路のサイン設置状況の把握方法	12
2-2-2. 調査概要	14
2-2-3. 国際空港施設を例としたサイン設置状況の把握	17
2-2-4. 効率の良い測定間隔についての考察	20
2-3. 避難者視野内のサイン量に基づく経路探索し易さの予測方法	24
2-3-1. 避難者視野に存在するサインの分類	24
2-3-2. 調査概要	25
2-3-3. サイン設置状況と経路探索し易さの関係	28
2-3-4. サインの立体角投射率に基づく経路探索し易さの予測式	30
2-4. まとめ	36

#### 第3章 円滑な避難誘導へ配慮したサイン整備

3-1. はじめに	39
3-2. 公共交通施設内部の避難経路におけるサイン整備の現状と課題	39
3-2-1. 調査概要	39
3-2-2. 国際空港ターミナルのサイン整備	44
3-2-3. 地下鉄駅舎のサイン整備	48
3-3. 都市空間に配備された広域避難場所への避難誘導標識	51
3-3-1. 都市空間における避難誘導標識の必要性	51

3-3-2. 京都市が管轄する空間把握に有効な標識	52
3-3-3. 調査概要	54
3-3-4. 標識の設置状況	56
3-3-5. 標識の特徴	58
3-3-6. 標識の記載文字の視認性	59
3-3-7. 現状の問題点と対策	62
3-4. まとめ	63

## 第二部 建築火災に対応した避難経路の視環境設計

### 第4章 避難経路の視環境条件と避難者視力に基づく歩行速度の計算モデル

4-1. はじめに	67
4-2. 実験	67
4-2-1. 実験空間	67
4-2-2. 実験手順	69
4-2-3. 設定する視環境条件	69
4-2-4. 被験者	69
4-3. 定常順応状態での歩行速度の予測	71
4-4. 非定常順応状態での歩行速度の予測	72
4-5. 煙の中での歩行速度の予測	74
4-6. 歩行速度と心理状態の関係	76
4-7. 避難経路の視力に基づく避難行動予測モデル	77
4-8. まとめ	79

### 第5章 火災煙の粒子の付着

5-1. はじめに	83
5-2. 実験	83
5-2-1. 実験装置	83
5-2-2. 火源	84
5-2-3. 実験手順	84
5-2-4. 実験装置の性能	85
5-3. 煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ の導入	86
5-3-1. $\zeta$ の定義	86
5-3-2. 煙粒子の付着における付着対象材料の影響	86
5-4. 煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ と光学的濃度 $C_s$ の関係	86
5-5. まとめ	88

## 第6章 煙粒子の付着を考慮した火災煙下の視対象輝度予測

6-1. はじめに	91
6-2. 煙粒子の付着を考慮した火災煙下の視対象輝度の予測式	91
6-2-1. 煙粒子の散乱特性の取り扱い	91
6-2-2. 散乱媒質中における松浦の光の透過基礎式	92
6-2-3. 煙粒子の付着を考慮した視対象輝度予測式	96
6-2-4. 予測式の検証	98
6-3. 二層ゾーンモデルによる煙性状の把握	102
6-4. 煙粒子の付着を考慮した避難者視野輝度分布の表現	103
6-4-1. 想定条件	103
6-4-2. 火災の状況	104
6-4-3. 避難者の視野輝度分布	105
6-4-4. 避難誘導標識の初期輝度継続時間の比較	106
6-5. 大邱地下鉄火災における車両内サインの視認性	107
6-5-1. 大邱地下鉄火災の概要	107
6-5-2. 非常用ドアレバーのサインの物理性状	108
6-5-3. 記載文字の視認距離	108
6-6. まとめ	112

## 第7章 火災時避難経路の床面照度簡易計算法

7-1. はじめに	115
7-2. 作業面切断法を適用した床面照度簡易計算モデルの構造	115
7-2-1. 本研究における作業面切断法適用の妥当性	115
7-2-2. 煙の無い状態での床面照度簡易計算	116
7-2-3. 煙の有る状態での床面照度簡易計算のモデル	121
7-3. 水溶液模型実験による仮想膜透過率・反射率の決定	124
7-3-1. 実験概要	124
7-3-2. 縮尺の違いに対する光学的濃度計算の妥当性	126
7-3-3. 煙性状および空間性状と基準化照度の関係	127
7-3-4. $CsZ_{\text{smoke}}$ と基準化照度の関係	128
7-3-5. 平均光路長 $d$	130
7-3-6. 仮想膜の反射率・透過率の関数決定	131
7-3-7. 床面照度簡易計算モデルの精度	132
7-4. まとめ	134

## 第8章 二層ゾーンモデルを用いた火災時避難経路での避難行動予測

8-1. はじめに	139
-----------	-----

8-2. 煙層温度による非常用照明器具の破損の取り扱い	139
8-3. ケーススタディの設定	140
8-3-1. 京都御池地下街の概要	140
8-3-2. 検討領域	141
8-3-3. 煙流動予測計算における設定条件	142
8-3-4. 火源および避難経路の設定	143
8-3-5. 区画内床面照度計算における設定条件	144
8-4. 火災時の煙の性状と避難経路の床面照度	144
8-4-1. 検討領域の煙の分布	144
8-4-2. 避難経路の煙性状と床面照度	144
8-5. 避難経路における歩行速度と心理状態	146
8-5-1. 青年の避難行動	146
8-5-2. 避難行動における年齢層の比較	147
8-6. 避難誘導灯の輝度変化	148
8-7. まとめ	148

## 第9章 総括

9-1. 本研究の成果	151
9-2. 課題と展望	153

発表論文一覧

謝辞

# 第1章 序論

## 1-1. 研究の背景

我が国は災害列島と呼ばれるように、毎年多くの自然災害に見舞われており、2011年3月11日に発災した東日本大震災の記憶は未だに新しい。地震災害では電気や水道などのライフラインが断絶され、建物の倒壊なども含めて通常目にしてきた都市環境が大きく変貌する。その中で被災者を安全な避難先へ迅速に誘導することは、都市空間の備えるべき防災機能の一つである。地震直後に停電となる場合、特に商業施設や地下街のように昼光が入り込まない建築空間においては、避難誘導灯が避難行動の手がかりとして重要な役割を担っていたことは、東日本大震災の時にも経験されたことであったが、東京のように震源地から遠く停電に至らない場所にあっても、揺れを感じた直後に人々が落ち着いて迅速な避難行動を取るためには、避難出口を明快に示す視環境計画が必須である。また特に京都市のように、その空間に不慣れな観光客が大量に押し寄せる地域においては、大規模災害時の帰宅困難者対応として、屋外の広域避難場所への適切な誘導も重要である。

避難誘導灯の視認性については、明視三要素に基づいた設計が行われており、光源の高輝度化に伴い寸法を小型化した避難誘導灯が、そのデザイン性の高さから建築空間の中に多用されるようになった。停電により背景が暗黒になった場合は、寸法が小さくなくても輝度が高くなり周辺との輝度対比も上がると、寸法が大きく低輝度だった以前のデザインと同等かそれ以上の視認性を確保できるものである。近年 LED 光源の効率が飛躍的に上がり、LED 光源を用いた照明器具が市場に多く占めるようになっていたため、避難誘導灯の高輝度化・小型化もこれから進む可能性が高い。しかし小型化された避難誘導灯が停電していない時に避難者に寄与するか考えると、様々なサインや広告であふれた建築空間内においては、小型であるが故にその中に埋没してしまい、人々が避難経路を検出する時に肝心の役目を果たさないことが大いに危惧される。

また避難誘導灯は消防法に基づき、防火対象物の種類により設置間隔が定められている。連続的に避難誘導を行うことが目的で設置間隔が定められているが、十分配慮せずに機械的に等間隔に設置すると、複雑に入り組んだ避難経路において避難経路の方向を見失う状態を作ることがある。東京や大阪などの大都市には、多くの複雑な地下空間が存在しているが、分岐点などで出口方向が分からなくなり立ち往生する人が発生するのも、出口や目的地への適切なサイン誘導が行われていないことを表したものである。

このように避難経路の誘導に関して適切な設計をするには、災害環境下での誘導灯や標識の視認性を向上すると共に、それを取り巻く周囲環境の関わりについても言及する必要がある。

火災は最も高い頻度で我々が遭遇する災害であり、日常的に各地で発生している。平成 21 年度<sup>1)</sup>には 51,139 件発生しており、その内の 55.5%が建物火災である。全火災による被害者は死者 1877 人・負傷者 7654 人であり、建築火災における死者は 1352 人と多いが、中でも避難遅れによる被害者が約 60%を占めている。過去の火災事例では、新宿歌舞伎町雑居ビル火災（2001 年 9 月）や韓国大邱市営地下鉄火災事故（2003 年 2 月）のように、火災煙に巻かれて避難困難な状況であったため多数の被害者が出た例が見られる。このような火災による被害を最小に食い止めるためには、防火対策を万全にするだけでなく、円滑に避難行動が行えるような避難経路の視環境設計も重要で、火災時の煙の伝搬とそれに伴う避難経路の視認性低下を把握することが必要である。

## 1-2. 既往の関連研究と残された課題

### 1-2-1. 経路探索と視野情報

都市・建築空間の経路探索に関する研究は数多く存在するが、空間内にあるサイン情報を量的に把握して経路探索行動との関係をみたものは、渡邊ら<sup>2)</sup>や金ら<sup>3)</sup>の研究等に僅かに見られるに留まる。

渡邊ら<sup>2)</sup>は建築空間の経路探索とサイン情報量の関係を把握するにあたり、床面を 1.0[m]×1.0[m]のグリッドで分割し、グリッド中央に被験者を立たせてサイン情報（案内板、方向版、室名板）が視認できるグリッド範囲を抽出し、さらにサインの視認の程度で重み付けした上で、空間全域のサイン情報密度を算出して数値化している。しかしこの手法だと空間にどの程度サインが設置されていたのかが把握できず、また得られた情報量には視認できるか否かという人間の判断が含まれていて、空間のサイン情報量を客観的に判断したものとは言い難い。

金ら<sup>3)</sup>は屋外に設置された公共サインの単位面積[km<sup>2</sup>]あたりの設置個数を求めて対象地区のサイン整備状況を判断している。行政側の設置サインの管理を主題に置いており、防災面も含む行政サービスの充足度を測るのに有益である。しかしサイン利用者（経路探索者）にとって視認できて有用なサイン情報量がどの程度存在しているのかを把握することはできていない。

都市や建築空間が大規模・複雑化している現在において、災害時だけでなく日常の場面でも経路探索し易いサイン整備は重要な課題である。しかし既往の知見だけでは、具体的なサイン設計へ適応するのが困難である。

### 1-2-2. 避難行動と避難経路の照明状態の関係

避難行動に関する研究は、大きく単独行動と集団行動に対象を区別される。大規模災害時の避難では集団による群衆避難が支配的になる場合があるが、群衆避難においても一人一人の避難者による避難経路選択の判断が影響する。本論文では、災害の規模にかかわらず、個々の避難者にとって避難し易い視環境要因を抽出し避難経路を効果的に設計する手法を開発することを目的としている。それ故、特に単独避難行動に着目し、視環境の状態が避難行動にどのように影響するかについて、既往の関連研究を調査した。



災害時に対応する非常用避難照明システムの基準化を目的として、Simmonsは視環境の床面照度・均斉度・グレアを説明変数として歩行速度への影響に関する評価実験を行った<sup>4)</sup>。年齢によって視認性が変わることや予備実験で確認した上で、50才前後の被験者10名を採用し、1000[lx]の環境に2分間順応させた後、0.019、0.038、0.051、0.068、0.183、0.28[lx]及び平常時想定照度300[lx]の7種の床面照度状態での実験空間（反射率45%）の移動時間を測定した。安全に障害物を回避するには最低0.28[lx]が必要であることを示した。また順応照度50[lx]後の避難経路の均斉度を1:1～50:1（その時の最低照度は0.2[lx]）まで変化させ、その条件内では不均一性が移動時間に影響しないことを示した。さらに0.2[lx]の避難経路において6～1420[cd]のグレア源が歩行速度に及ぼす影響について検討し、光度が高いほど移動時間が長くなることを示したが、注視点とグレア源の角度や大きさなどその他の要因も結果に左右するので、非常用避難照明の基準化にグレアを取り上げるのは困難であることを考察している。

またほぼ同じ時期に、Nikitinは一人の歩行ではSimmonsと同等の0.3[lx]が適切だが、12人以上の集団になると0.5[lx]必要なことを示した<sup>5)</sup>。

これらの結果は年齢などの被験者属性の影響を考慮していないことに着目し、Jaschinskiは若者（18～30才）と高齢者（50～70才）の2集団について評価実験を行った<sup>6)</sup>。平常時想定照度250[lx]・1000[lx]と非常時想定照度0.24、0.48、0.96、1.92、3.85、7.7[lx]の6種の条件を設定しており、被験者は1.5～2分間平常時想定照度に順応した後、歩行距離27mの空間を歩行する。実験結果として歩行時間、障害物接触、避難経路の視認性や歩行可能性についての主観評価、歩行後の計算能力の低下率で表す心理的余裕を得ている。結果、障害物を安全に回避できる最低非常用照度は0.24[lx]であるが、歩行時間が飽和するには若者で1[lx]高齢者で2[lx]が必要であること、心理評価は年齢の違いが見られないことを示した。最終的に、歩行時間・心理評価ともに床面が低照度で順応する空間と歩行空間の床面照度差が大きくなるにつれて避難が困難になり、非常用照度の推奨値としては、一般的に2[lx]以上、高齢者に対しては4[lx]以上が望ましいという結論を導いた。

Webberは歩行距離の違うこれらの結果を歩行速度に置き換え、床面照度との関係を表現した（図1-1）<sup>7)</sup>。これが今日の避難安全検証法の基礎として利用されている。

これら一連の研究を踏まえて、停電時の非常用照明要件が定められている。しかし残された課題も多い。まずJaschinskiが示したように年齢によって同じ照明環境であっても歩行速度が変わるが、被験者のその環境下での視認能力の違いが考慮されていない。周囲の視環境条件と避難者の視認能力の組合せによってその空間の視認性が決定されるため、災害時の避難経路における避難行動に重要な要素として関わるものとする。高齢者と若者の歩行速度の差異が、その環境下の視認能力によって一元化して説明可能であるのか、或いは身体特性や運動能力及び他の要因にも影響されるのかが明確にされていない。

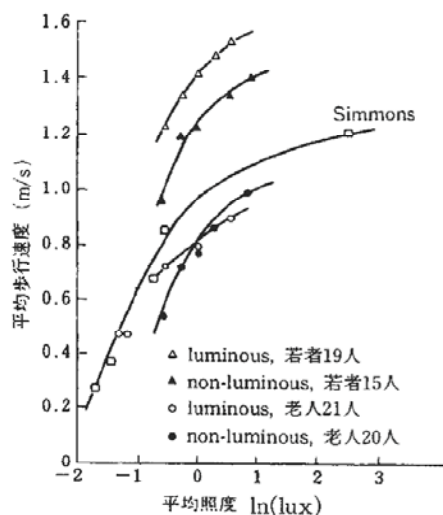


図 1-1 避難経路の床面照度と歩行速度の関係<sup>7)</sup>

また床面照度などの空間の照明条件から歩行速度を予測する方法が具体的に示されていない。さらに既往研究では、順応照度と歩行空間の照度の違いが歩行速度に対してどの程度影響するかについても示していない。我が国の避難安全検証では建物内の人々が避難を開始して完了するまでの避難行動時間に対して、避難者が火煙により避難上支障がある状態（煙層高さが床面から 1.8[m]）になる避難限界時間との比較によって建物の安全性を判断する<sup>8)</sup>。火災煙によって視認性が低下し避難行動時間にどの程度影響するか予測するためには、照明条件に応じた歩行速度の予測式および適用範囲を明示することが必須である。

### 1-2-3. 火災環境下での視認性と避難行動

火災環境下での視認性と避難行動については、神の一連の研究が有名であり、避難安全設計において国内外を問わず広く引用されている。

まず火災環境下での視認性予測における基礎式として、煙の中での発光型標識の視程距離 $D_{\text{発光型標識}}$  [m]を式 1-1 で、また反射型標識の視程距離 $D_{\text{反射型標識}}$  [m]を式 1-2 で表している。この時、煙の光学的濃度を $C_s$  [1/m]、視認限界の輝度対比を $C$ 、煙の光学的濃度に対する散乱係数の比を $k$ 、照明光の散乱による煙の輝度を $L_s$  [cd/m<sup>2</sup>]、発光型標識の輝度を $L_t$  [cd/m<sup>2</sup>]、反射型標識の反射率を $\alpha$ としている<sup>9)</sup>。これらの式より、火災煙中の標識の視程距離を伸ばすには、標識の輝度を高くすることが重要であることがわかる。なお光散乱量について様々な建材の燃焼実験で検討しており、式中の $k$ 値は白煙・くん焼煙の場合は $k \div 1$ 、有炎燃焼煙で黒煙の場合は $k \div 0.5$ 、白煙混じりの有炎燃焼煙の場合は $k \div 0.5 \sim 1$ であることを求めている。

$$D_{\text{発光型標識}} \div \frac{1}{C_s} \log_e \frac{L_t}{CkL_s} \quad \text{式 1-1}$$

$$D_{\text{反射型標識}} \div \frac{1}{C_s} \log_e \frac{\alpha}{Ck} \quad \text{式 1-2}$$

発光型標識を煙の充満した実験装置の中に入れて、ガラス越しに標識を観察する評価実験を行い、煙の光学的濃度 $C_s$ と視程距離 $D$ の間には $C_s D = \text{const.}$ なる関係があることを示した。実用的指標として、発光型標識では $C_s D = 5 \sim 10$ 、反射型標識では $C_s D = 2 \sim 4$ を提案しており、廊下や階段の見通し距離は一般的な壁面反射率を考慮して $C_s D = 2$ と取り扱えることを示している<sup>10)</sup>。

また、煙粒子の分光透過光特性は、建材の種類や発煙条件、光学的煙濃度や発煙後の経過時間などによって変化することを示し、発光型標識が単色光の場合、赤色光の方が青色光よりも煙中の視程距離が長くなることを示した<sup>9)11)</sup>。

神は火災煙を想定した実大空間を様々な評価実験も行っている。刺激性の強い白煙を充満させた廊下で視程距離を測定し、煙の光学的濃度がある値以上になると急激に視程距離が短くなり $C_s D = \text{const.}$ の関係が成立しなくなることを示した<sup>12)</sup>(黒煙でも刺激性が弱い場合は $C_s D = \text{const.}$ が成立する)。この原因として、刺激性の強い白煙中でランドルト環視力を測定し、刺激煙の光学的濃度が $C_s > 0.25 [1/m]$ の条件では式 1-3 が成立することを示した。

$$C_s (0.133 - 1.47 \log_e C_s) D = \text{const.} \quad \text{式 1-3}$$

さらに歩行速度と光学的煙濃度の関係について通常照明(床面平均照度 80[lx])と停電時(同 0.1~0.5[lx])を想定した評価実験を行った<sup>13)</sup>。結果を図 1-2 に示す。床面照度の違いに加え、光学的煙濃度や刺激性の有無によって歩行速度が変化し、濃い煙や刺激性のある煙の中では、目隠しでの歩行速度(図中の戸川の結果: 0.3[m/s])と概ね等しくなることを示した。また結果に基づき、視程距離と許容される光学的煙濃度の関係は、不特定者に対する視程距離 $D = 15 \sim 20 [m]$ と光学的煙濃度 $C_s = \text{約 } 0.1 [1/m]$ 、建物内熟知者に対する $D = 3 \sim 5 [m]$ と $D = 0.4 \sim 0.7 [1/m]$ が適当であると論じている。

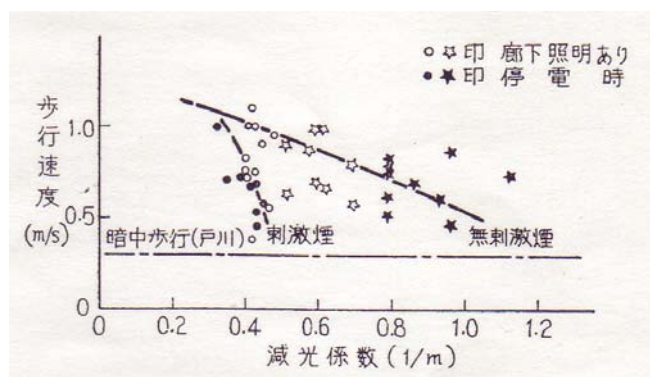


図 1-2 避難経路の照明状態・光学的濃度・煙の刺激性と歩行速度の関係<sup>13)</sup>

火災煙が人間の心理状態にどのように影響するかについても検討している。心理学の分野で使用されている安定検査器を用い、床面平均照度 30lxの実験室に光学的煙濃度を毎分 0.1[1/m]の割合で増加させた場合の、被験者(一般人 25 名と建物内を熟知している火災研究員 24 名)の心拍数や心理的動揺度を測定した<sup>14)</sup>。結果、殆どの被験者が動

揺し始める光学的煙濃度は、一般人で  $0.15[1/m]$ ・研究員で  $0.5[1/m]$ であり、それらを火災発生時に安全に避難できる限界の光学的煙濃度として定義できるとしている。

また火災煙の影響による思考力（暗算の正解率）と記憶力の低下を測定し、共に光学的煙濃度の増加に伴い低下することを示した<sup>15)</sup>。

このように神の一連の研究では、火災煙下における人間の避難行動について様々な要素の影響について取り扱っており、具体的に煙に曝された状態の被験者実験結果を提供している、数少ない貴重な知見でもある。しかし、様々な視認性評価実験において、被験者の視認能力の取り扱いについては言及しておらず、高齢社会の我が国において高齢者に配慮した避難経路の設計を具体的に行うには、追加検証が必要である。

また火災の煙粒子は建築空間内部の表面に付着することは周知のことであるが、その粒子の付着について取り扱っておらず、光源輝度や壁面反射率の変化に伴う標識の視認性の予測方法については言及していない。

#### 1-2-4. 避難安全検証法

建築防災計画では、建築物の居室の出口や廊下・階段などの設計が、在館者の火災時における避難経路として適切になっているかどうかを避難計算によって検討する<sup>16)</sup>。避難計算の対象は、出火の可能性のある居室・階および全館の3通りであり、在館者の全てが火災室（または火災階、または建物全体）から避難終了するまでに要する時間と煙が避難上支障のある高さまで降下する時間を算出して、前者が後者より短いことを検証する。この時、避難時間の計算に必要な建築空間の情報は、居室の床面積や天井高さ・有効出口幅・歩行距離などであり、照明状態など避難者の視認性に関わる物性値を取り扱っていない。前出の神の知見<sup>13)</sup>にあるように、煙により避難行動が影響されるので、現在の単に煙のない室空間情報だけに基づいて避難時間を計算するのは不十分である。

歩行距離は什器や柱などの障害物を避けるように平面図を元に出口までの最遠距離として設定されるが、空間が単純な矩形でなかったり障害物が多かったりすると、避難経路を進む避難者の視野の中に避難出口が存在しない場合が生じ、特に避難者が空間を熟知していなければ、避難出口を探索することが必要になる。経路探索のためにより多くの避難時間を要することが考えられるが、このような避難時間の遅延について、避難安全検証法では取り扱われていない。

#### 1-2-5. 二層ゾーン建物内煙流動モデル

建築火災における避難計算において、複数階多数室にまたがる煙流動を予測する必要があるが、それにはゾーンモデルが適用されることが多い。二層ゾーンモデルは、区画火災において高温の上部層（煙層）と低温の下部層（空気層）に二分され、各層では物理的性質において一様であると仮定しており、上部層の平均温度や煙層の厚み等が短時間で予測可能である。特に田中らにより開発された非定常の二層ゾーンモデルBRI2<sup>17)</sup>、およびその後継のBRI2002<sup>18)</sup>は、簡易性と高い信頼性により、我が国では建築物の安全設計の標準ツールとして広く利用されている。Watanabeら<sup>19)</sup>は気体の単位重量当たりに含まれる煙粒子等による吸収断面積  $\phi [m^2/kg]$  を煙濃度の単位として導入し、二層ゾ

ーンモデルにおいて光学的煙濃度Csを予測する計算モデルを構築した。その関係式を用いて山田ら<sup>20)</sup>は二層ゾーンモデルを用いた避難安全評価シミュレーションプログラムに、鈴木らは多層ゾーンモデル<sup>21)</sup>に組み込んで、区画内の煙の光学的濃度計算を可能としている。

このように、二層ゾーンモデルを用いることで、建築火災の煙流動を容易に予測することができるが、具体的にその計算結果を用いて火災時の照明状態を予測するモデルは未だ検討されていない。

### 1-3. 研究の目的

本研究は、災害時に円滑な避難行動が行えるように、視認性に基づく避難経路の設計手法を確立することを目的としている。それには、停電など地震災害時に発生する事態や、火災時の煙のような照明環境を悪化させる要因など、災害状況に応じて検討する必要がある。また日常の建築都市空間において適切な避難誘導サイン整備をどのように行うべきかについても言及する必要がある。

そこで本研究では、火災と火災以外に分けて避難経路の適切な設計について検討する。

火災以外の災害には、日常の建築視環境の避難設計について、特に避難誘導に関わるサイン情報に着目し、避難者視野内におけるサイン情報量を客観的に把握し、避難経路探索し易さとサイン情報量との関係を抽出する。また屋外の都市空間に存在する広域避難場所に対するサイン整備について言及する。

また災害にかかわらず、避難経路の煙を含む照明条件に対する歩行速度や心理状態について、特に人間の視認能力の影響について検討し、避難行動の予測式を構築すると共に災害時における高齢者の避難の取り扱いについて考察する。

火災に対して、煙粒子の付着現象に着目して、火災ステージが変化することにより煙粒子の付着に伴う光源輝度等の変化を予測する式を抽出する。さらに建築安全設計で広く利用されている二層ゾーンモデル BRI2002 を用いて、火災時の煙流動に伴う室内の床面照度の簡易予測モデルを構築し、その環境下で歩行速度等の避難行動を予測するモデルを提案する。

### 1-4. 本論文の構成

本論文は二部 9 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景、目的および論文の構成を示す。

第一部は、日常の建築都市空間における避難経路の視環境設計について、第 2 章と第 3 章に示す。

まず第 2 章では、避難経路探索のし易さに基づくサイン配置の評価法について述べる。避難経路を通る避難者視野における各種サインの立体角投射率を用いてサイン設置状

況を把握する手法を示した上で、視野内のサイン量に基づく経路探索し易さ予測式を構築する。

第3章では、円滑な避難誘導へ配慮したサイン整備について述べる。まず第2章の手法を用いて、世界各地にある公共交通施設の避難経路のサイン設置状態を評価し、現状の課題を示す。また観光客が多く訪れる京都市に設置されている広域避難場所への避難誘導サインの整備状況と課題を述べる。

第二部は、火災に対応した避難経路の視環境設計について、第4章から第8章にかけて示す。

第4章では、煙や急激な順応変化など火災時に想定される視環境において、避難者の視力に基づく避難行動の予測について述べる。

第5章では、火災時の区画火災における煙粒子の付着モデルを構築する。

第6章では、第5章で得られる予測式を用いて、煙粒子の付着を考慮した視対象輝度の予測モデルを示した上で、それを用いて煙粒子の付着を考慮した避難者視野輝度分布の表現を試み、さらに2003年2月に発生した韓国大邱地下鉄火災時の車両内サインの視認性を評価する。

第7章では、第5章で得られる予測式を用いて、煙粒子の付着を考慮しながら火災時の避難経路の床面照度を簡易に計算する方法について、水溶液模型実験結果を用いて計算モデルを構築する。

第8章では、第4章と第7章の予測モデルを用いて、二層ゾーンモデルを用いた火災時避難経路での避難行動の予測方法についてケーススタディを用いながら述べる。

最終章である第9章では総括を行う。

#### 参考文献：

- 1) 平成22年度消防白書
- 2) 渡邊昭彦・森一彦：サイン情報の情報密度と探索行動のばらつき度の関連分析 建築空間における探索行動の認知心理学的考察その1、日本建築学会計画系論文報告集、No.437、pp.77-86、1992.7
- 3) 金賢淑・浅野聡・梶島邦江・堀越義章・後藤春彦・戸沼幸市：公共サインの整備計画に関する研究—東京都世田谷区における公共サインの課題と提案—、日本建築学会計画系論文報告集、No.415、pp.67-78、1990.9
- 4) R. C. Simmons : Illuminance, diversity and disability glare in emergency lighting、Lighting Research and Technology、Vol.7、No.2、pp.125-132、1975
- 5) V. D. Nikitin : Trebuemyj uroven osvescennosti ot avariynogo osvescenija dlja evakuacii ljudej、Svetotechnica、Vol.6、No.9、1973、(cited in Weis 1977)

- 6) Wolfgang Jaschinski : Conditions of emergency lighting、Ergonomics、Vol. 25、pp.363-373、1982
- 7) G. M. B. Webber : Emergency Lighting Recommendations、National Lighting Conference、pp.138-150、1984
- 8) (社)日本火災学会編：はじめて学ぶ建物と火災、共立出版、2007
- 9) 神忠久：煙中の誘導標識の見通し距離について (I)、日本建築学会論文集、No.182、pp.21-29、1971
- 10) 日本火災学会編：火災便覧第3版、共立出版、1997
- 11) 神忠久：煙中の誘導標識の見通し距離について (III)、日本建築学会論文集、No.204、pp.47-53、1973
- 12) 神忠久・山田常圭：煙の中でのものの見え方 (その3) 煙の刺激性の影響、照明学会誌、Vol.70、No.1、pp.19-22、1986
- 13) 神忠久・山田常圭：煙の中でのものの見え方 (その2)、照明学会誌、Vol.59、No.2、pp.28-34、1980
- 14) 神忠久：煙の中での心理的動揺度について、Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering、Vol.30、No.1、pp.1-6、1980
- 15) 神忠久：煙の中での思考力および記憶力の低下について、Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering、Vol.32、No.2、pp.1-5、1982
- 16) 田中哮義：改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、2002
- 17) 田中哮義、中村和人：＜二層ゾーンの概念に基づく＞建物内煙流動予測モデル、建築研究所報告、No.123、建設省建築研究所、1989
- 18) 社団法人建築研究振興協会：BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム、2003
- 19) Jun-ichi Watanabe and Takeyohsi TANAKA : Prediction of Ceiling Jet Smoke Concentration under Two Layer Environment、Fire Science and Technology、Vol.24、No.3、pp.151-164、2005
- 20) 山田茂・水野雅之・円谷信一・田中哮義・若松孝旺：建物火災時の避難安全評価シミュレーションプログラムの開発(その1) 煙性状予測モデルの概要、日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2、pp.215-216、2005
- 21) 鈴木圭一・田中哮義・原田和典・吉田治典：火災空間における垂直温度分布の予測モデル 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発その1、日本建築学会環境系論文集、No.582、pp.1-7、2004





# 第一部 日常の建築都市空間における避難経路の視環境設計

## 第2章 避難経路探索のし易さに基づくサイン配置の評価法

### 2-1. はじめに

空間の構造が大規模かつ複雑で、避難者が避難出口を探索することが困難と想定される建築物については、避難口誘導灯や通路誘導灯を避難経路に設置して避難誘導を行う必要がある。消防法ではこれらの規格や設置位置などが定められており、建物所有者はそれを遵守する義務がある。しかし、我が国は建物内の広告設置に対する規制がないため（概して屋外においても広告は氾濫しているが）、様々な不要なサインが建物内に氾濫している。避難誘導灯などは停電時の避難経路探索には非常に有効であるが、太陽光が建物内に差し込む日中や災害直後で停電に至らない状況では、不要なサインが避難経路探索のノイズとなり、被災者が瞬時に避難経路を見つけられないことが危惧される。また非災害時においても、建物利用者にとって出口までの空間把握が容易にできることは重要であり、特に建物が大規模で複雑な形状になる傾向の強い都市部においては、防災対策を含め考慮すべき課題である。

避難経路を移動する人間（観察者）の視野に入ってくるサインの見かけの大きさは、観察者の移動に伴い変化する。避難経路のサインがどのように配置されているか把握するには、避難経路を進む観察者の視野におけるサイン情報量を面積などで表す必要がある。図 2-1 に示されるように、人間の網膜には中心から約 10 度の範囲に錐体細胞が集中しており、中心窩で詳細に視対象を識別することができるが、中心窩から離れて周辺視になるにつれてぼんやりとしか物が見えなくなる。中心窩からの角距離（中心窩＝0 度）と視力の関係を示した図 2-2<sup>2)</sup>によると、角距離が大きくなるほど視力が低下しており、それは中心窩からの角距離における錐体細胞の密度分布と関連している（図 2-3<sup>2)</sup>）。また図 2-4 に示すように、人間の両眼視野における情報収集の範囲<sup>3)</sup>において、視軸を中心とした中心精密視は 2°、文字判読限界は 10～20°、記号識別限界は 10～60°といわれており、中心視に比べて周辺視では視覚情報の収集が困難になる。避難経路の側面に設置されたサインや標識は、直進しながら避難する人において、移動に伴って視野の中心から周辺へと離れていくに従い、認識されにくくなると考えられる。

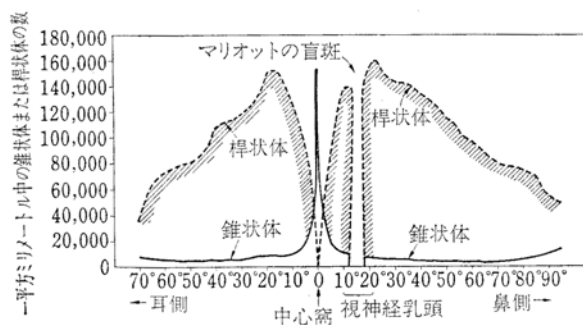


図 2-1 網膜上の錐体と桿体の密度分布<sup>1)</sup>

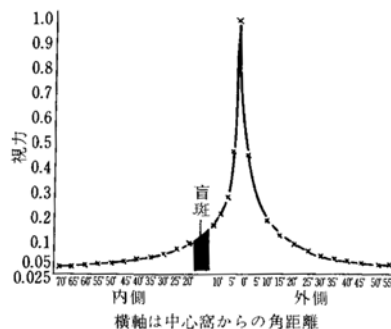


図 2-2 中心窩からの角距離と視力<sup>2)</sup>

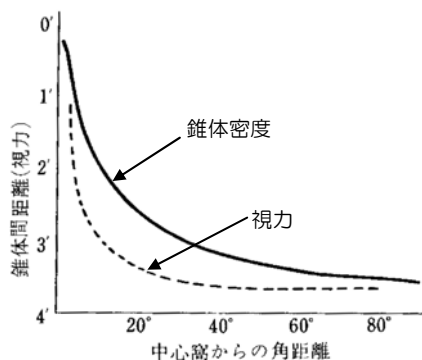


図 2-3 錐体密度と視力<sup>2)</sup>

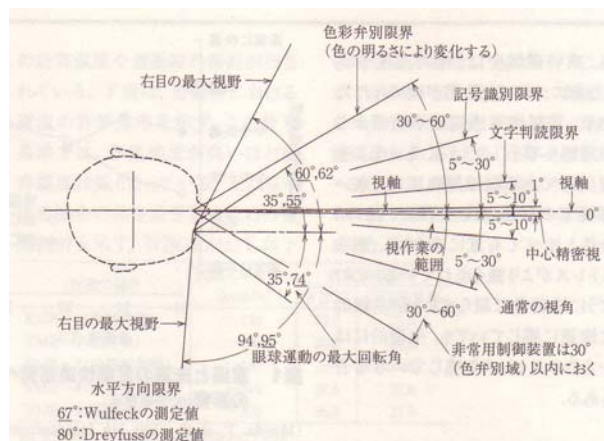


図 2-4 両眼視野における有効範囲<sup>3)</sup>

火災時における人間の避難行動特性として、向光性（明るい方向を目指して逃げる）や向開放性（開かれた感じのする方向へ逃げる）などに加え、直進性（見通しのきく真っ直ぐな経路を逃げる）があることが、過去に発生した火災事例の調査から整理されている<sup>4)</sup>。すなわち、分岐点のように避難進行方向が分からなくなる場合、避難者は周囲を見渡して経路探索を行うが、避難経路が明快で出口が一方向の場合、避難者は進行方向に視線を向けて出口へ向かうと考えられる。

このような視覚現象や避難行動特性を考慮して、本章では、避難者における経路探索のし易さの観点に立って、避難経路の出口進行方向に視線を向けた避難者視野におけるサインの立体角投射率を用いたサイン計画手法について述べる。

## 2-2. 立体角投射率を用いたサイン設置状況の把握<sup>5)</sup>

本項では視覚メカニズムに対応したサイン情報量として視野画像におけるサインの立体角投射率を用い、避難安全検証法で設定された避難経路のサインによる誘導状況を評価するために、不特定多数の人が利用する国際空港の防災計画書上での想定避難経路について実測調査を行った。なお実態調査で得られた結果を用いて、建物の避難経路にあるサイン設置状況の簡易測定方法についても示す。

### 2-2-1. 識別し易さに基づく避難経路のサイン設置状況の把握方法

#### 2-2-1-1. 魚眼レンズ写真撮影による視野内サイン情報量の把握

近年では、デジタルカメラの技術進歩は目覚しく、魚眼レンズ取付け可能な一眼レフタイプも市場に出るようになった。画角約 180 度の魚眼レンズで撮影した画像は人間の視野<sup>注1)</sup>にある情報を殆ど取り込むことができる。そこで本章では、魚眼レンズを取付けたデジタルカメラを用いる。使用する魚眼レンズ（Nikon FC-E8）での撮影画像の射影方式は等距離射影であり、等立体角投射率となる面積が画像中心部と周辺部で異なる。そこで、魚眼レンズ画像の射影方式が容易に変換できるプログラムSPCONV ver.0.6<sup>6)</sup><sup>注2)</sup>を用いて、等距離射影画像を正射影画像へ変換し、Visual Basic6.0で著者らが作成した読取プログラムを用いて立体角投射率を算出した。魚眼レンズの撮影画像は 2272

×1704 ピクセルの解像度であり、正射影画像の円の直径は 1636 ピクセルに相当する。筆者らが作成した読取プログラムには拡大機能と自動面積計算機能が備わっており、十分拡大表示した画像にあるサインを多角形で範囲指定し、その範囲にある面積を正射影画像の円の面積で除することで立体角投射率を算出した。なお周辺部のサインの見落としを防ぐため、魚眼レンズ撮影地点と同じ位置で撮影した通常レンズの写真画像を必ず参照することとした。図 2-5 に魚眼レンズで撮影した等距離射影画像と、それを正射影へ変換した画像の例を示す。



図 2-5 魚眼レンズでの撮影画像の変換例（左：等距離射影画像、右：変換後の正射影画像）

本章で取り扱った実測調査では防災計画書にある避難経路（対象空間での最遠距離であり、防災計画書の避難時間算出に関する平面図に記載されたものと同じ経路）に沿って避難出口にレンズを向けて視野画像を撮影するが、その間隔は渡邊らの研究<sup>7)</sup>での測定間隔を参考にし、また様々な形状の経路について容易に測定できることを考慮して 1.0 [m]間隔とした。なお避難安全検証では、健常成人の通路部の避難時の歩行速度を 1.0[m/s]に設定しており<sup>8) 注3)</sup>、今回の実測調査で得られた 1.0 [m]間隔の撮影画像は、避難者が 1 秒毎に見ている視野画像に相当する。

#### 2-2-1-2. 避難経路のサイン情報の分類

サインは情報伝達の手段の一つであるが、伝達内容によって大別すると、記名、誘導、案内、説明、規制の 5 種類である<sup>9)</sup>。建物内の避難経路を示すサインとしては、矢印やピクトグラムでデザインされた避難口誘導灯や通路誘導灯が重要であり、寸法や設置位置などは法律により定められている。しかしそれ以外の、空間把握に役立つ案内サインや記名サインも避難経路探索に有益である。また避難経路案内システムに関する ISO 規格では、避難口誘導灯や非常用照明だけでなく、避難経路を連続的かつ明確に示す案内線もサインの一つとして有効であると推奨している<sup>10)</sup>。一方、広告についてみると、我が国では建物内の規制がないため、公共的な施設であっても至る所に広告が設置されており、避難経路探索に有効なサイン情報を埋没させ避難者の認識を妨げることが容易に推測できる。このような状況を考慮して、本研究ではサイン情報を表 2-1 に示す 8 種類に分類して取り扱う。

表 2-1 避難経路のサイン情報の分類

項目	内容	役割
a)通路誘導灯・標識	矢印で避難口へ誘導する	避難経路探索に直接的に寄与するサイン
b)避難口誘導灯・標識	避難口を示す	
c)案内・配置図※	建物内の配置を示す	避難経路探索に間接的に寄与するサイン
d)ライン情報	避難口を示す手すりやタイル	
e)記名※	建物内の室や設備名を示す	
f)誘導※	建物内の室や設備へ誘導する	
g)規制・説明※	建物内での規制や説明事項	避難経路探索のノイズとなるサイン
h)広告	広告(店舗名含む)	

## 2-2-2. 調査概要

### 2-2-2-1. 調査対象

施設を熟知した人が多数を占める事務所ビルなどと比較して、不特定多数の人間が利用する公共施設では、災害時の避難に十分配慮したサイン計画が行われるべきである。利用者や施設規模の異なる様々な公共施設の中で、特に施設の空間構成を十分把握していない利用者が多数存在し、施設利用者にとってサイン情報が経路探索の重要なツールとなるのは公共交通施設であり、その中でもサイン情報の内容（ピクトグラムの図柄や文字情報）が十分把握できない外国人の占める割合が大きいのは国際空港である。そこで日本国内にある国際空港の主要なものの一つを調査対象として選定し、その非制限エリアについて実測調査を行う。調査対象とした国際空港は、年間着陸回数が約 5.8 万回、年間乗降客数が約 1600 万人の第一種空港であり<sup>11)</sup>、日本だけでなく東アジア域にとっても重要な拠点空港の一つである。

調査対象となる国際空港のメインターミナルは地上 1 階～4 階で構成されており、利用者の動線が交差しないように、各階に異なる機能を割り当てている（1 階：国際線到着フロア、2 階：国内線出発到着フロア、3 階：店舗フロア、4 階：国際線出発フロア）。その防災計画書において避難安全検証の対象となった想定避難経路は全部で 142 経路あるが、その中で非制限エリア内だけで完結する想定避難経路は 73 経路である。そこで今回調査対象として、非制限エリア内各階での最長想定避難経路を含め、表 2-2 および図 2-6 に示す 7 経路を選択した。図 2-6 の太線の丸印は各避難経路の起点、矢印のある太折れ線は避難経路とその進行方向、黒塗部分は柱や機械室等である。また図中の M1F1 などの記号は避難経路を表しており、表 2-2 と対応している。

### 2-2-2-2. 調査日時

調査は 2005 年 12 月 4 日（想定避難経路 M1F1 および M3F2）と 2006 年 1 月 26 日（M2F1、M2F2、M3F1、M4F1、M4F2）の日中 9:00～16:00 に行った。天候は両日ともに晴天である。二日間に渡って調査したが、日時による広告量の違いは認められなかった。

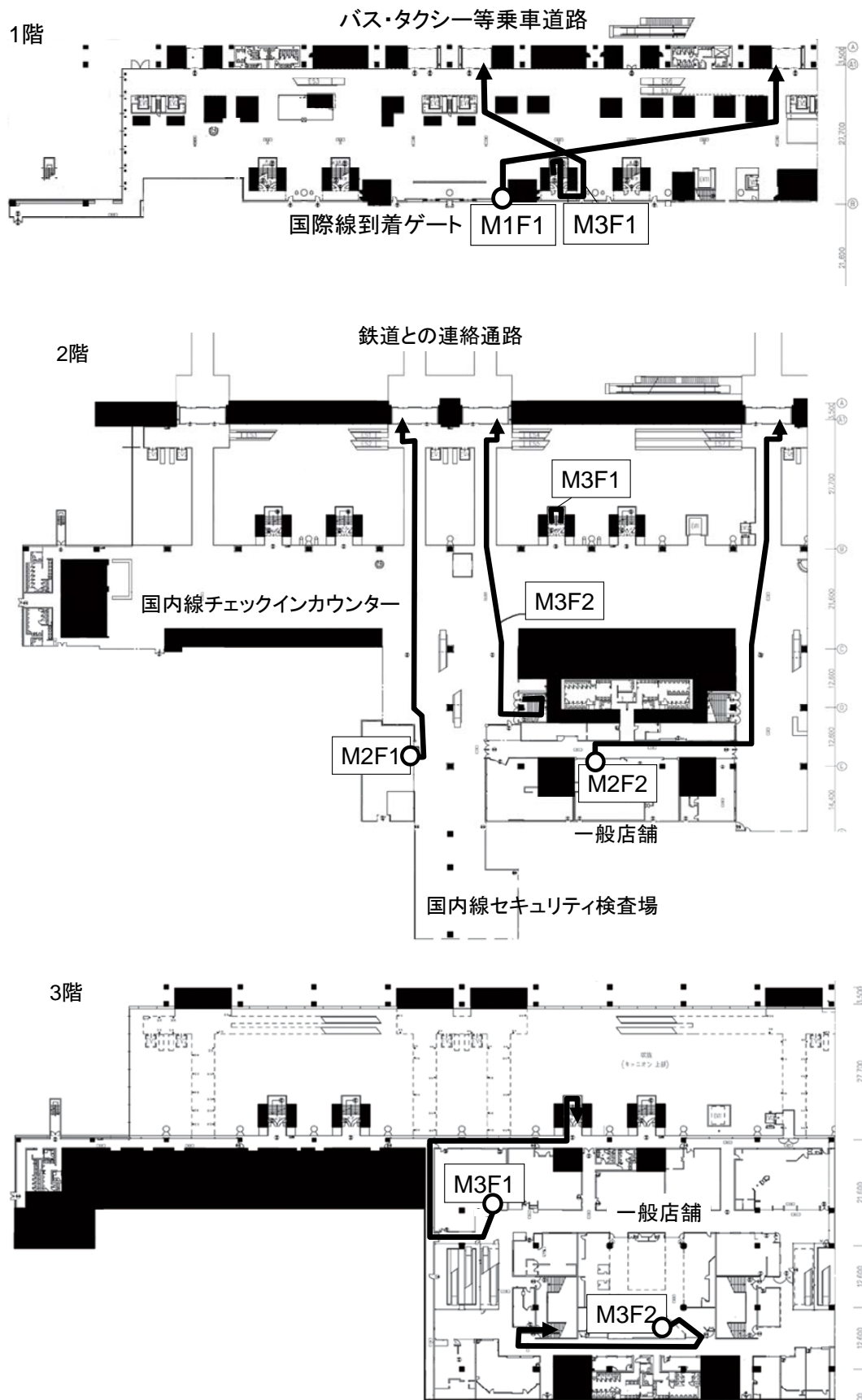


図 2-6 調査対象空間における各避難経路の進行方向 (1)



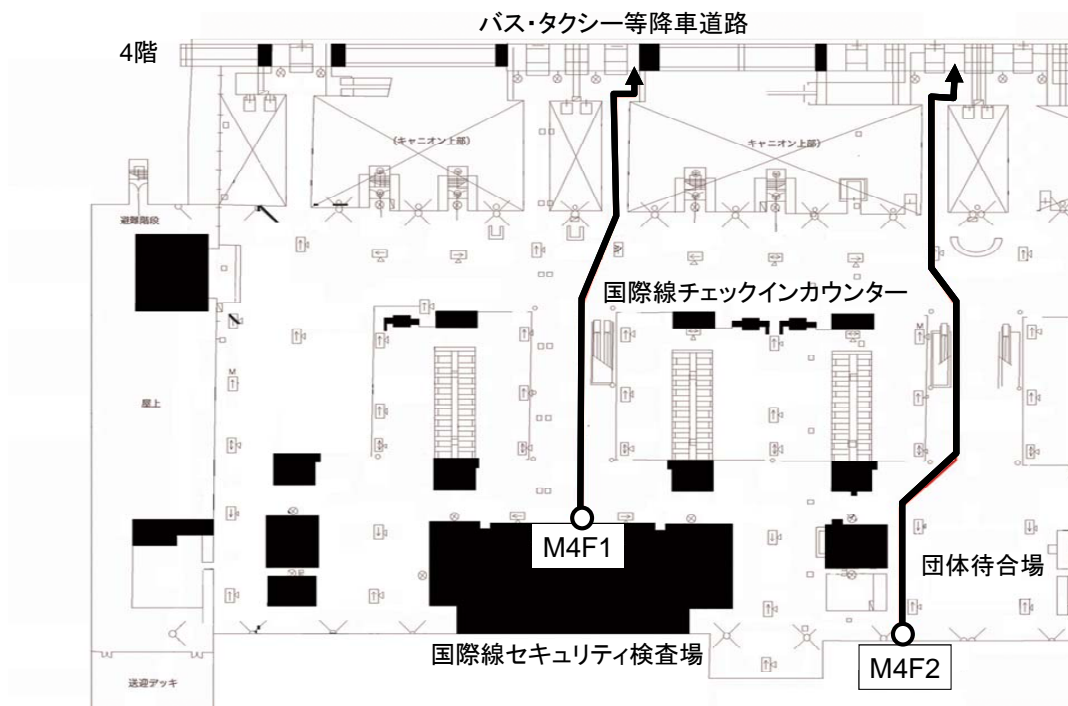


図 2-6 調査対象空間における各避難経路の進行方向 (2)

表 2-2 調査対象の避難経路

階	経路	距離[m]	避難起点	避難終点
1F	M1F1	74	国際線到着ゲート	1階出口(バス等乗車道路)
2F	M2F1	77	国内線セキュリティ検査場	2階出口(鉄道との連絡通路)
	M2F2	117	一般店舗	2階出口(鉄道との連絡通路)
3F	M3F1	170	一般店舗	1階出口(バス等乗車道路)
	M3F2	139	一般店舗	2階出口(鉄道との連絡通路)
4F	M4F1	88	国際線セキュリティ検査場	4階出口(バス等降車道路)
	M4F2	114	団体待合場	4階出口(バス等降車道路)

※M2F2の経路は、起点から44[m]の地点で、M2F1の避難経路と合流する

### 2-2-2-3. 魚眼レンズを用いた立体角投射率の測定方法

避難経路を歩行する避難者の視野内のサイン情報量を把握するため、魚眼レンズを装着したデジタルカメラで視野画像撮影を行い、撮影画像から表 2-1 に示す各種サインの立体角投射率を算出した。使用する視野画像撮影機器は、本体 Nikon 製 Coolpix 990 および Coolpix 4500、魚眼レンズ Nikon 製 FC-E8 である。なお、Nikon FC-E8 の画角 field angle は 183 度であり、SPCONV (180-degree field angle) で画像変換する際に微量な誤差が生じるが、(網膜における錐体細胞の分布から考えても) 円周に近いサインは中心部のサインに比べて経路探索に与える影響が非常に小さいので、本研究では SPCONV の画像に基づき算出した立体角投射率の値を採用する。

避難者の眼高に相当するように三脚を用いてレンズ中心部を床面から 1.5[m]<sup>12)</sup>の高さに固定し、表 2-2 の想定避難経路の起点から、図 2-6 に示す終点に向かう方向にレンズを設定して 1.0[m]間隔で撮影した。

撮影で得られた魚眼画像に存在している全てのサインについて、記載されている文字

情報や画像・ピクトグラムを元に、主要な情報が何かを判断して表 2-1 の区分化をし、そのサインの立体角投射率を算出した。

#### 2-2-2-4. 避難経路の光環境の測定方法

サインが設置されている避難経路の照明環境状態もサインの視認性に関与する要素であり、サインの形状や設置数等に影響すると考えられる。そこで調査対象避難経路の照明量として、避難経路を歩行する避難者の眼前照度を測定した。使用する測光機器は色彩照度計 Minolta 製 CL-200 であり、視野画像撮影と同じ地点・向きで測定した。

#### 2-2-3. 国際空港施設を例としたサイン設置状況の把握

避難誘導灯の緑色（10G4/10）消火器のサインの赤色（7.5R4/15）といったように、人への危害および財物への損害を与える事故防止・防火、健康上有害な情報並びに緊急避難を目的として、産業環境及び案内曜に使用する安全標識にはISO<sup>13)</sup>およびJIS<sup>14)</sup>で規定する安全色が利用される。しかし本調査ではこれら色彩については言及せず、避難経路視野画像におけるサインの設置状況の把握方法として、立体角投射率を用いる。

##### 2-2-3-1. 避難経路の各種サインの立体角投射率

1.0[m]間隔で撮影した避難経路視野画像における各種サインの立体角投射率の変動を図 2-7 に示す。サインの分類は前出表 1 の項目について行い、それぞれのサインに対応する網部の高さでそのサインの立体角投射率を表現している。すなわち、積み上げられた折れ線の最上部の数値が、撮影地点におけるサイン情報総量の立体角投射率を意味している。また表 2-3 に 1.0[m]間隔に測定したサインの立体角投射率の統計量を示す。サインの種類によっては避難経路視野画像の中にサインが存在しない場合もある。そこで表の最小値を記載している欄では、0 を記入する代わりに避難経路撮影全画像中（例えば避難経路の距離が 74[m]の場合、画像は起点 0[m]を含め 75 枚存在する）でサインが存在しない割合[%]を求めて、表中の括弧内に示している。表中の白抜き文字部分は、それぞれの避難経路における(a)～(h)のサイン情報の分類項目のうち、最も大きい立体角投射率を示している。

図 2-7 および表 2-3 の結果より、7つの避難経路のサイン設置状況は多岐にわたっており、選択した避難経路に偏りはないと考えられる。どの避難経路も約 15m 間隔毎に(a)通路誘導灯が配置されているが、視野内に全く存在しない割合も高い。(b)避難口誘導灯は(a)通路誘導灯の立体角投射率の平均値の約 10 倍であり終点に近づくほど立体角投射率が大きくなるが、終点でも 0.025 程度である。一方、経路探索のノイズとなる(h)広告は殆どの避難経路で平均立体角投射率が最大となっており、図 2-3 に示されているように連続的に視野の多くの面積を占めている。本来であれば経路探索を容易にするために大きな面積を占めるべき(a)～(f)のサインに比べて、(h)広告のサインが視野の多くを占めていることは、避難誘導計画問題であると判断でき、本報告で示したサイン情報量の把握方法は避難環境の良否評価に有効であると考えられる。なお(c)(e)(f)のサインは通常の施設内経路探索においても有効な情報であり、本調査方法は施設内経路探索におけるサイン情報量の把握にも適用できる。

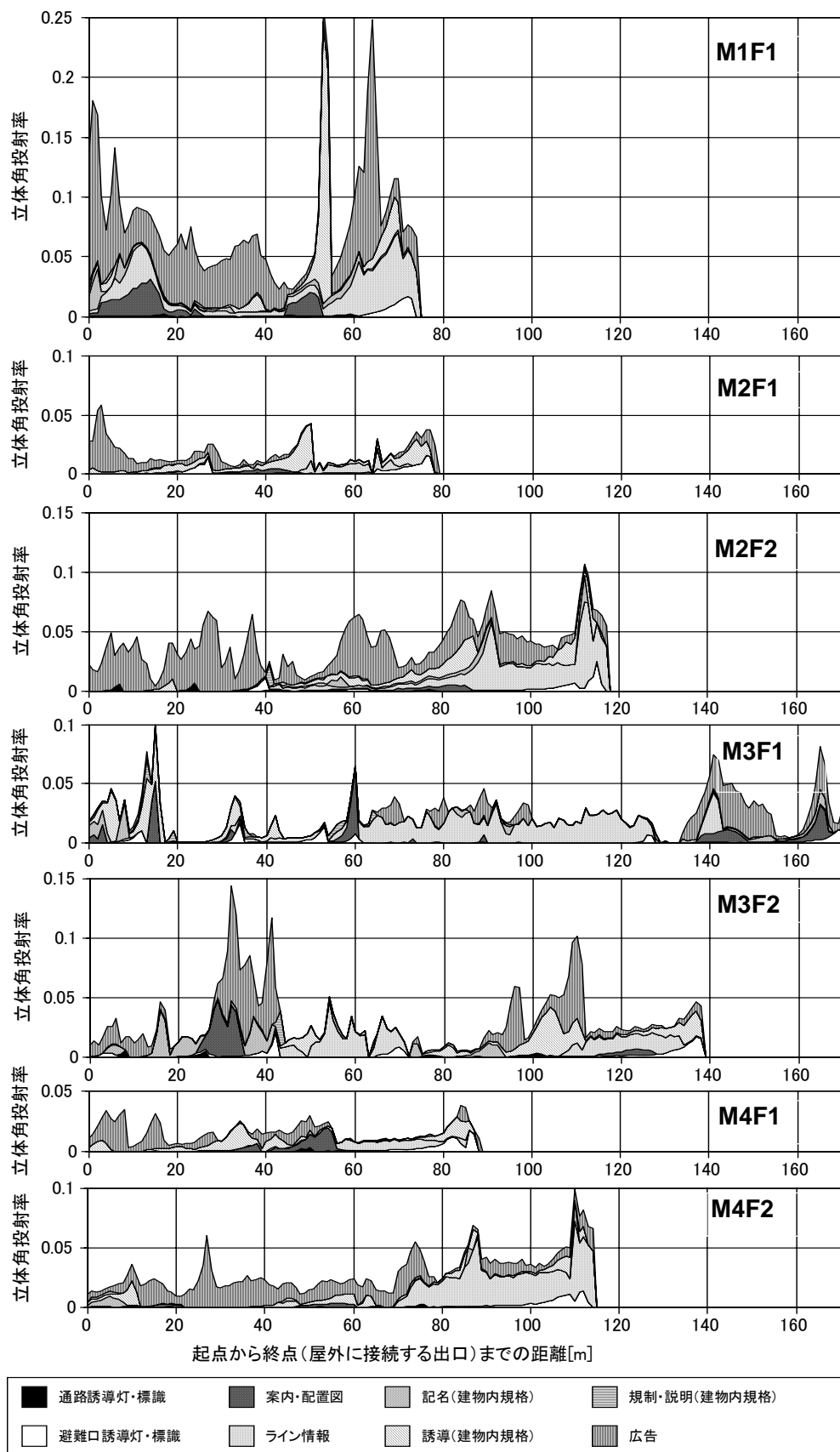


図 2-7 避難経路の各種サインの立体角投射率分布



表 2-3 1.0m 間隔毎に測定した各種サインの立体角投射率に関する統計量

経路		サイン情報の分類項目								サイン 合計
		a)通路	b)避難口	c)案内	d)ライン	e)記名	f)誘導	g)規制	h)広告	
平均値	M1F1	0.0002	0.0015	0.0058	0.0153	0.0035	0.0108	0.0005	0.0419	0.0794
	M2F1	0.0000	0.0021	0.0007	0.0019	0.0000	0.0059	0.0001	0.0072	0.0178
	M2F2	0.0003	0.0015	0.0006	0.0091	0.0013	0.0044	0.0003	0.0222	0.0398
	M3F1	0.0000	0.0011	0.0025	0.0085	0.0014	0.0027	0.0007	0.0058	0.0228
	M3F2	0.0002	0.0017	0.0024	0.0058	0.0030	0.0048	0.0007	0.0115	0.0300
	M4F1	0.0001	0.0014	0.0018	0.0021	0.0001	0.0042	0.0000	0.0062	0.0159
標準偏差	M4F2	0.0001	0.0013	0.0004	0.0104	0.0008	0.0031	0.0002	0.0128	0.0291
	M1F1	0.0004	0.0037	0.0085	0.0154	0.0055	0.0350	0.0011	0.0357	0.0496
	M2F1	0.0000	0.0034	0.0011	0.0035	0.0001	0.0070	0.0002	0.0105	0.0112
	M2F2	0.0009	0.0031	0.0012	0.0143	0.0030	0.0059	0.0018	0.0154	0.0198
	M3F1	0.0000	0.0026	0.0076	0.0096	0.0035	0.0082	0.0020	0.0100	0.0172
	M3F2	0.0008	0.0033	0.0082	0.0085	0.0067	0.0082	0.0026	0.0201	0.0252
最大値	M4F1	0.0004	0.0033	0.0040	0.0032	0.0002	0.0049	0.0002	0.0080	0.0081
	M4F2	0.0003	0.0026	0.0009	0.0151	0.0025	0.0040	0.0005	0.0084	0.0164
	M1F1	0.0020	0.0170	0.0307	0.0572	0.0333	0.2363	0.0057	0.2001	0.2564
	M2F1	0.0002	0.0154	0.0042	0.0180	0.0004	0.0354	0.0019	0.0564	0.0581
	M2F2	0.0065	0.0253	0.0053	0.0721	0.0230	0.0254	0.0193	0.0671	0.1072
	M3F1	0.0002	0.0162	0.0547	0.0347	0.0305	0.0542	0.0166	0.0371	0.1011
最小値	M3F2	0.0056	0.0208	0.0476	0.0472	0.0394	0.0405	0.0285	0.0967	0.1437
	M4F1	0.0027	0.0181	0.0190	0.0093	0.0010	0.0211	0.0012	0.0344	0.0382
	M4F2	0.0018	0.0140	0.0035	0.0669	0.0174	0.0206	0.0023	0.0599	0.0985
	M1F1	-(34.7%)	-(26.7%)	-(54.7%)	0.0021	-(4.0%)	-(12.0%)	-(68.0%)	0.0028	0.0223
	M2F1	-(97.4%)	-(3.8%)	-(65.4%)	-(69.2%)	-(92.3%)	-(2.6%)	-(92.3%)	-(20.5%)	0.0019
	M2F2	-(59.3%)	-(2.5%)	-(63.6%)	-(29.7%)	-(56.8%)	-(17.8%)	-(81.4%)	0.0015	0.0046
値	M3F1	-(95.3%)	-(48.0%)	-(73.1%)	-(30.4%)	-(63.7%)	-(51.5%)	-(73.1%)	-(60.8%)	-(2.3%)
	M3F2	-(89.9%)	-(41.0%)	-(82.7%)	-(46.0%)	-(71.9%)	-(42.4%)	-(70.5%)	-(35.3%)	-(0.7%)
	M4F1	-(94.4%)	-(56.2%)	-(53.9%)	-(61.8%)	-(86.5%)	-(10.1%)	-(95.5%)	-(25.8%)	0.0034
	M4F2	-(79.1%)	-(30.4%)	-(77.4%)	-(57.4%)	-(80.0%)	-(23.5%)	-(76.5%)	-(2.6%)	0.0098

表中の白抜き文字部分は、a～hのサイン分類で最も大きい値を示す

## 2-2-3-2. 避難経路の眼前照度

本研究ではサインが設置されている避難経路の照明環境状態として、床から 1.5m 高さで出口方向に向けた鉛直面照度を眼前照度と捉えて測定した。調査対象の避難経路における 1.0[m]間隔の眼前照度分布を図 2-8 に示す。避難経路によって眼前照度分布が大きく異なり、一般店舗を通り抜ける 3 階の避難経路では眼前照度 100[lx]以下が多く、天窗や側窓によって日光が十分取り込まれる 4 階の避難経路では出口付近が非常に明るい。CIE屋内照明基準<sup>15)</sup>によると、空港の連絡路等の維持照度は 150 [lx]であり、安全性や視覚的快適性を維持するためにこの値を下回ってはならないと規定されているが、測定結果で見られたように規定以下のものを含め様々な環境の経路が選択されているといえる。7 つの避難経路の眼前照度について維持照度 150[lx]の達成確率を含む統計量を表 2-4 に示す。

表 2-4 避難経路の眼前照度に関する統計量

階	経路	平均値[lx]	標準偏差	最小値[lx]	最大値[lx]	維持照度達成率[%]
1F	M1F2	240.5	55.8	104.3	329.2	94.7
2F	M2F1	286.2	151.4	108.9	606.1	79.5
	M2F2	142.3	41.7	45.6	248.9	41.5
3F	M3F1	131.5	83.2	25.8	348.2	35.1
	M3F2	142.4	96.4	19.2	720.3	37.1
4F	M4F1	496.5	379.9	186.3	1411	100.0
	M4F2	359.4	288.4	162.6	1204	100.0

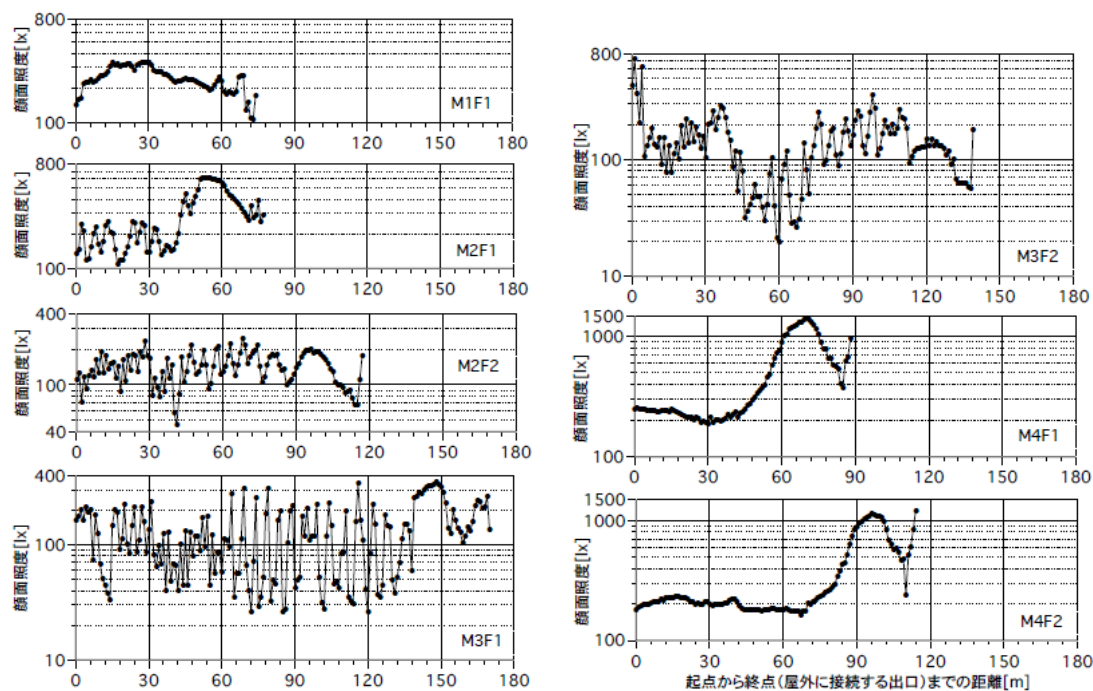


図 2-8 1.0m 間隔で測定した避難経路の起点～出口までの眼前照度分布

#### 2-2-4. 効率の良い測定間隔についての考察

効率良く実空間のサイン情報の設置状態を把握するためには、データ収集の間隔がなるべく広いほうが好ましい。特に様々な避難経路についての大規模な調査や、実空間でのサイン設置状況に応じた主観評価実験を実施するためには、測定間隔をできるだけ広くとり、簡便に避難経路のサイン設置状況が把握できることが必要である。そこで今回の実測調査結果を用いて、1.0[m]間隔から 10.0[m]間隔までデータ収集間隔を 1.0[m]毎に拡張させた時に、サインの設置状況の各種測定結果がどの程度異なるかを考察する。

視野内の各種サインの立体角投射率の結果に対して、測定間隔を 2.0[m]から 10[m]までに想定し、その間隔に該当するデータのみ抽出して 1.0[m]間隔の測定結果と比較する。表 5 の数値は 1.0[m]間隔で測定した視野内の全てのサインの立体角投射率（表 2-3 のサイン合計の列の数値）に対して、想定した間隔毎に抽出した結果の平均値・最大値・最小値を比較し、式 2-1 から式 2-3 を用いて算出した変化率を示している。但し最小値については 0 が存在するため、その場合は△印と共に式 2-3 の分子の値を示している。

$$R\Phi_{ave} = \frac{\Phi_{ave(i)} - \Phi_{ave(1.0)}}{\Phi_{ave(1.0)}} \quad \text{式 2-1}$$

$$R\Phi_{max} = \frac{\Phi_{max(i)} - \Phi_{max(1.0)}}{\Phi_{max(1.0)}} \quad \text{式 2-2}$$

$$R\Phi_{min} = \frac{\Phi_{min(i)} - \Phi_{min(1.0)}}{\Phi_{min(1.0)}} \quad \text{式 2-3}$$

$R\Phi_{ave} \cdot R\Phi_{max} \cdot R\Phi_{min}$ 

視野内の全てのサインの立体角投射率（全サイン立体角投射率）の平均値・最大値・最小値の変化率

 $\Phi_{ave(1.0)} \cdot \Phi_{max(1.0)} \cdot \Phi_{min(1.0)}$ 

1.0[m]間隔で測定した全サイン立体角投射率の平均値・最大値・最小値

 $\Phi_{ave(i)} \cdot \Phi_{max(i)} \cdot \Phi_{min(i)}$ 

想定したi[m]間隔のデータからなる全サイン立体角投射率の平均値・最大値・最小値、但しi=2.0～10

表 2-5 1.0m 間隔で測定した視野内全サインの立体角投射率に対する変化率と有意差検定結果

		想定した測定間隔									
		経路	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
平均値変化率	M1F2	0.00	0.01	-0.03	-0.03	0.08	0.03	0.04	0.22	0.00	
	M2F1	0.02	-0.05	0.00	0.05	-0.04	0.13	-0.01	-0.09	0.01	
	M2F2	-0.02	-0.04	0.03	-0.07	-0.02	0.03	-0.09	0.04	-0.11	
	M3F1	0.01	0.03	0.03	0.10	-0.05	-0.03	-0.01	-0.19	-0.01	
	M3F2	-0.01	-0.02	0.01	0.03	0.04	-0.18	0.11	-0.14	0.08	
	M4F1	0.01	-0.04	0.02	0.02	-0.05	0.10	-0.02	-0.18	-0.25	
M4F2	0.02	0.01	-0.03	0.02	-0.08	-0.03	0.02	0.05	0.05		
最大値変化率	M1F2	-0.03	-0.15	-0.03	-0.33	-0.15	-0.27	-0.03	-0.15	-0.47	
	M2F1	-0.07	0.00	-0.36	-0.27	-0.41	-0.29	-0.41	-0.52	-0.27	
	M2F2	0.00	-0.24	0.00	-0.30	-0.28	0.00	0.00	-0.35	-0.35	
	M3F1	-0.31	0.00	-0.35	0.00	-0.35	-0.44	-0.52	-0.52	-0.35	
	M3F2	0.00	-0.17	0.00	-0.29	-0.40	-0.46	0.00	-0.40	-0.29	
	M4F1	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.00	-0.10	-0.36	-0.23	
M4F2	0.00	-0.22	-0.17	0.00	-0.32	-0.17	-0.17	-0.39	0.00		
最小値変化率	M1F2	0.00	0.06	0.28	0.06	0.29	0.29	0.38	0.06	0.93	
	M2F1	2.85	0.00	2.85	3.52	3.25	2.85	2.85	3.25	4.13	
	M2F2	0.90	0.00	0.90	0.00	1.13	1.13	0.90	3.52	1.66	
	M3F1	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	
	M3F2	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.00	△0.01	
	M4F1	0.34	0.00	1.14	0.34	0.59	0.78	1.16	0.00	0.34	
M4F2	0.00	0.01	0.00	0.00	0.11	0.01	0.11	0.11	0.00		
検定	M1F2								*		
	M2F2						*				
	M3F1				*						

表中の数値が±0.10～0.20は薄トーン部、±0.20以上は黒トーン部を示す  
1m測定間隔結果との有意差検定 \*\*5%有意、\*10%有意

表 2-5 下部にある検定の欄は、1.0[m]間隔の測定全結果と想定した間隔毎に抽出した全結果の2つの母平均の差の検定を行い、5%有意（\*\*）又は 10%有意（\*）が確認された経路についてのみ示している。なお結果を見やすく表現するため、表中の薄いトーン部は、数値が±0.10 以上 0.20 未満（1.0m 間隔の測定結果に対して 1 割以上異なったことと同義）、黒トーン部は数値が±0.20 以上を表している。表 2-5 より、検定により有意差が確認されたのは、想定した測定間隔が 5.0[m]、7.0[m]、9.0[m]の各 1 箇所×3 経路で見られただけである。つまり測定間隔を大きくとっても、測定結果そのものに大きな違いはないと考えることができる。次に立体角投射率の平均値の変化率を見ると、測定間隔が 5.0[m]からは薄いトーン部（±0.10 以上 0.20 未満）が出現するがそれは 1 箇所のみであり数値も 0.10 であるので、測定間隔 6.0[m]までなら 1.0[m]間隔の測定結果と大差ないと判断することができる。一方、立体角投射率の最大値および最小値の変化率でみると、黒トーン部（±0.20 以上）も多く見られており、最大値や最小値といっ

た特定の限定された結果については、測定間隔の違いが影響するので注意を要することが明らかになった。

サインの分類項目毎の結果に対しても同様に測定間隔を 2.0[m]から 10[m]までに想定し、その間隔に該当するデータのみ抽出して 1.0[m]間隔の測定結果とそれぞれ比較して、2つの母平均の差の検定を行い、5%有意（\*\*）又は 10%有意（\*）が確認されたものを表 2-6 に示す。表の空白欄は有意差が認められなかったことを意味する。なお表で示されていない組合せ（例えば a）通路誘導のサインにおける M1F1 など）は、想定した測定間隔の結果のいずれも 1.0[m]間隔の測定結果と有意な差が認められなかったことを意味している。表 2-6 より、想定した測定間隔が 3.0[m]以上になると有意差が認められ出し、想定した測定間隔が長くなるほど有意差が認められた結果が多くなる傾向が見られる。測定間隔 6.0[m]以下で有意差が見られた避難経路は M2F2、M3F1、M3F2 であるが、これらは店舗エリアと空港施設エリアが混在していて避難経路内で利用形態が大きく異なることが考えられる。

また表 2-6 の結果をサイン情報分類項目別に見ると、有意差が認められた測定間隔において大きく 2 種類のタイプに分かれる。一つは(a)通路誘導・標識及び(b)避難口誘導灯・標識といった、消防法により設置間隔が定められているもので測定間隔 7m 以下に有意差が認められており、もう一つは(e)記名～(h)広告までで、測定間隔 8m 以上に有意差が認められている。前者は設置間隔が長く（一般に 20m）指示する距離が長いいため、連続していないと誘導方向を見失うものであり、また安全上やむを得ず設置するタイプのものなので機械的に等間隔に設置された箇所もあり、店舗エリアと空港施設エリアが混在して複雑に曲がるルートを通った場合に、短い距離で有意差が出たと考えられる。後者は目的地へ積極的に誘導するといったものか（e、f、h）、必要最低限の人に

表 2-6 サイン分類項目毎にみた、1.0m 間隔測定結果と想定間隔の結果との有意差検定結果  
（有意差が認められた条件のみ）

サイン情報 分類項目	経路	想定した測定間隔								
		2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
a)通路誘導灯・標識	M2F2					*				
	M3F2		*							
	M4F2						*			
b)避難口誘導灯・標識	M2F2				**					
	M3F2					*				
c)案内・配置図	M3F1		*		**					*
d)ライン情報	M3F2					*				
	M4F1						*			
e)記名	M2F2						*	**		
	M3F1							**		
	M4F2								*	**
f)誘導	M1F1								**	
	M3F1								**	*
g)規制・説明	M1F2									*
	M4F2							**		**
h)広告	M1F1							*		
	M4F1								*	
	M4F2								**	

1m測定間隔結果との有意差検定 \*\*5%有意、\*10%有意

情報提供すればよいもの（g）であるので、適切な位置にそれぞれ適切な寸法で設置されており、それが結果として 7m 以下の短い測定間隔では 1m 間隔測定結果と有意な差が生じないことになったと考えられる。

1.0[m]間隔の測定結果と想定した間隔毎に抽出した結果の 2 つの母平均の差の検定を行ったのは、想定した 2.0[m]から 10[m]の測定間隔毎に 63 条件（避難経路 7 通り×サイン合計を含むサイン情報の分類項目 9 通り）である。そこで、想定した測定間隔によって 1.0[m]間隔の測定結果と有意な差が見られる結果の出現率の変動を求め、図 2-9 に示す。5%有意の結果も 10%有意の結果もいずれも想定した測定間隔が長くなるほど出現率が大きくなる傾向が見られる。また二つの有意差の結果を合わせた場合、6.0[m]以上に測定間隔を長くすると 1 割以上の結果で 1.0[m]間隔の測定結果と有意な差が認められることがわかる。言い換えると、建物内の避難経路に設置されているサインの情報量を視野内の立体角投射率で把握する場合、その測定間隔は 5.0[m]まで長くしても、1.0[m]間隔で測定した結果と同等に扱えると考えることができる。

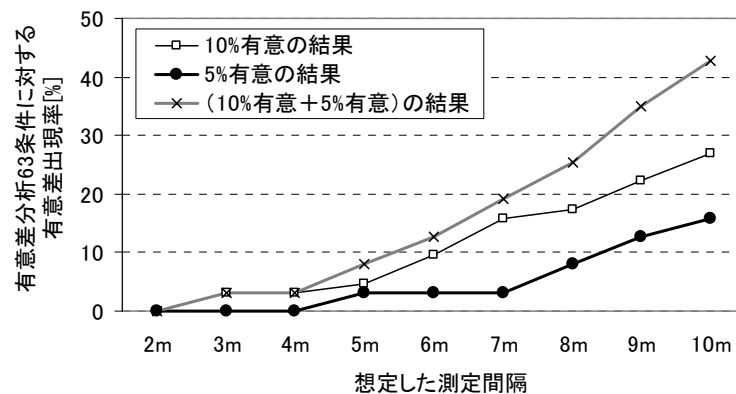


図 2-9 1.0m 間隔の測定結果と有意差がある結果の出現率変動

なお表 2-6 や図 2-9 に示したこれら有意差検定の結果は、避難経路のサイン設置状況の全体像について示したものであるので、前出表 2-5 にあったように最大値や最小値といった特定の限定された結果については、測定間隔を変えることで結果に影響することを意識する必要がある。このことは、1.0[m]間隔で測定した眼前照度の結果（図 2-4）に対しても同様に、測定間隔を 2.0[m]から 10[m]までに想定し、その間隔に該当するデータのみ抽出して 1.0[m]間隔の測定結果と比較した表 2-7 でも明らかである。有意差検定では想定した測定間隔が 10[m]の 2 経路について見られただけであり、平均値の変化率も測定間隔 5.0[m]までは 1.0[m]間隔の測定結果と同等の結果を得られると判断することができる。しかし、最大値および最小値の変化率でみると、薄いトーン部（ $\pm 0.10$  以上 0.20 未満）や黒トーン部（ $\pm 0.20$  以上）も多く見られており、特定の限定された結果については、測定間隔の違いが影響することが明らかになった。

表 2-7 1.0m 間隔での顔面照度に対する変化率と有意差検定結果

		想定した測定間隔								
	経路	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
平均値変化率	M1F2	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.04	-0.04	-0.09	-0.08	-0.04
	M2F1	-0.01	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.05	-0.09	-0.01	-0.12
	M2F2	-0.01	0.01	-0.01	-0.07	-0.06	0.01	-0.03	0.00	-0.05
	M3F1	-0.01	0.00	0.08	-0.09	-0.12	-0.14	0.10	-0.03	-0.15
	M3F2	0.01	-0.03	0.07	-0.07	-0.12	0.10	0.01	0.11	0.04
	M4F1	0.01	-0.01	0.01	-0.03	-0.04	-0.04	0.06	-0.03	-0.02
最大値変化率	M4F2	0.01	0.03	-0.02	-0.07	0.08	-0.01	-0.01	-0.04	-0.06
	M1F2	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.05	0.00	-0.01
	M2F1	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.11
	M2F2	0.00	-0.10	0.00	-0.21	-0.19	-0.07	-0.19	-0.10	-0.23
	M3F1	0.00	-0.05	0.00	-0.09	-0.10	-0.05	-0.10	-0.10	-0.11
	M3F2	-0.14	-0.42	-0.14	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42
最小値変化率	M4F1	0.00	-0.03	-0.06	0.00	-0.08	0.00	-0.08	-0.08	0.00
	M4F2	0.00	0.00	-0.06	-0.11	0.00	-0.11	-0.06	-0.11	-0.13
	M1F2	0.04	0.04	0.04	0.20	0.04	0.20	0.04	0.04	0.20
	M2F1	0.07	0.08	0.07	0.11	0.08	0.19	0.23	0.08	0.21
	M2F2	0.27	0.48	0.27	0.27	0.48	0.80	0.27	0.91	0.27
	M3F1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.01	0.00
検定	M3F2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.44	1.12	0.55	0.00
	M4F1	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00
	M4F2	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09
	M1F2									**
	M2F1									**

表中の数値が±0.10～0.20は薄トーン部、±0.20以上は黒トーン部を示す  
1m測定間隔結果との有意差検定 \*\*5%有意、\*10%有意

## 2-3. 避難者視野内のサイン量に基づく経路探索し易さの予測方法<sup>16)</sup>

本項では、視野画像におけるサインの立体角投射率を用いて、避難者視野内のサイン量に基づく経路探索し易さの予測方法について述べる。実空間の避難経路について各種サインの立体角投射率を算出した上で、同じ地点で主観評価実験を行い、両者の対応関係を抽出する。

### 2-3-1. 避難者視野に存在するサインの分類

建物内の避難経路を示すサインとして、避難口上部に設置された避難口誘導灯や通路壁面・床面に設置された通路誘導灯は非常に重要であり、これらの設置数や設置位置は消防法によって設定されている。このように避難経路探索に直結するサインを、本項でSign(A)と定義する。Sign(A)は、通路誘導灯 (Sign(A-a)) と避難口誘導灯 (Sign(A-b)) の2種類存在する。

室名や階表示のような記名サインや構内案内図は、通常の空間把握に役立つだけでなく、災害避難時においても経路探索に役立つものである。ISOの避難経路ガイダンスシステム<sup>10)</sup>では、非常照明や誘導灯だけでなく、床や壁に明確かつ連続的に出口までの避難経路を示したライン状のサインも、他のサインと同様に効果的であることを述べている。このような、間接的に避難経路探索に寄与するサインを、本項でSign(B)と定義する。Sign(B)は次の4つに細分類される：Sign(B-c)構内案内図、Sign(B-d)ライン情報、Sign(B-e)記名標識、Sign(B-f)誘導標識。

広告物は建物内部のあらゆる所に存在し、設置についての規制は存在せず、それは公共建築物においても例外はない。これら広告物は、避難経路探索時において、誘導灯な

どの重要なサインを見つける際のノイズとなることは大いに考えられる。建物内の禁止・説明事項に関するサインも、経路探索という観点では不要のものである。これらの経路探索時に悪影響を及ぼすサインを、本項で Sign(C)と定義する：Sign(C-g)規制・説明標識、Sign(C-h)広告物。

最終的に、避難者視野に存在するサインを、大分類で三種、小分類も入れて合計8種類のカテゴリーに区分し、表 2-8 および図 2-10 に示す。

表 2-8 記載情報に基づく避難経路のサイン分類

Type	Item	Content	Role
Sign (A)	a) Route guide lights/signage	Lead to emergency exits with arrows	Signs directly contributing to way finding during emergency evacuation
	b) Emergency exit lights/signage	Indicate emergency exits	
Sign (B)	c) Guide maps and layout drawings*	Show position within building	Signs indirectly contributing to way finding during emergency evacuation
	d) Line information	Handrails and tiles leading to emergency exits	
	e) Name identification*	Indicate names of rooms or facilities within building	
	f) Direction indicators*	Indicate the way to rooms or facilities within building	
Sign (C)	g) Regulations or Explanations*	Regulations or explanations pertaining to behavior within building, etc	Signs that represent noise from the standpoint of way finding during emergency evacuation
	h) Advertisements and publicity	Advertising (including name of store)	

\* For many of these, the design will be standardized within buildings.



図 2-10 サイン分類の例示

## 2-3-2. 調査概要

施設利用対象者や施設規模など様々なタイプがある公共施設の中で、公共交通施設は、その空間を十分把握していない利用者が非常に多く存在するため、利用者にとって、中に配備されたサイン情報は経路探索に非常に重要である。

そこで本項での調査対象として、日本とタイにある国際空港ターミナルの非制限エリアと地下鉄駅舎および地下商店街を選定した。地下商店街は公共交通施設ではないが、空間構成が複雑で設置されるサイン数が多い傾向にあり、後述で構築するサイン量に基づく経路探索し易さの予測式を、現実の様々な空間に適用可能とするために調査対象に加えている。近年、窓面積が大きく開放的なガラス建築が多く見られるので、その空間に



についても予測式が対応できるよう、開放的な国際空港を調査対象に加えた。調査した避難経路を表 2-9 に示す。それぞれの起点は、到着/出発ゲート・プラットホームの中央・店舗入り口とし、それぞれの施設において最も長い避難経路を選択した。図 2-11 から図 2-13 に調査を行った避難経路<sup>17)18)19)</sup>を示す。なおKIXの避難経路は前出図 2-6 と同様であり、避難経路番号が対応している。

調査はいずれも 9AM～4PM の間に実施した。使用する視野画像撮影機器は、本体 Coolpix 990&4500、魚眼レンズ FC-E8（共に Nikon 製）である。避難者の眼高に相当するように三脚を用いてレンズ中心部を床面から 1.5[m]の高さに固定し、避難経路の起点から避難出口に向かう方向にレンズを設定して 5.0[m]間隔で撮影した。

表 2-9 調査対象の避難経路

(1) Japan (investigation period: year/month)

facility	name	route	starting point and distance[m]	sub.
airport (2006/01)	KIX, Osaka Kansai	M1F1	international arrival gate S 70	9 persons Male 4 Female 5 Ave.age 27
		M2F1	domestic departure gate 75	
		M2F2	restaurant entrance 115	
		M3F1	restaurant entrance 170	
		M3F2	store entrance 135	
		M4F1	international departure gate N 85	
		M4F2	group waiting area 110	
subway station (2006/07)	Kyoto shiyakusho mae	J_S01	center of platform SE 115	18 persons Male 2 Female 16 Ave.age 25
		J_S02	center of platform NE 135	
		J_S03	center of platform N 145	
		J_S04	center of platform NW 155	
undergro und mall (2006/07)	Kyoto Oike	J_U01	shop 1 front, to N exit 85	Ave.age 25
		J_U02	shop 2 front, to NE exit 70	
		J_U03	shop 3 front, to SW exit 85	
		J_U04	shop 4 front, to N exit 50	

(2) Kingdom of Thailand (investigation period: year/month)

facility	name	route	starting point and distance[m]	sub.
airport	DMK, Don Mueang (2006/08)	T_A01	international departure gate E 105	5 persons Female 5 Ave.age 33
		T_A02	international departure gate W 100	
		T_A03	international arrival gate W 20	
		T_A04	international arrival gate E 30	

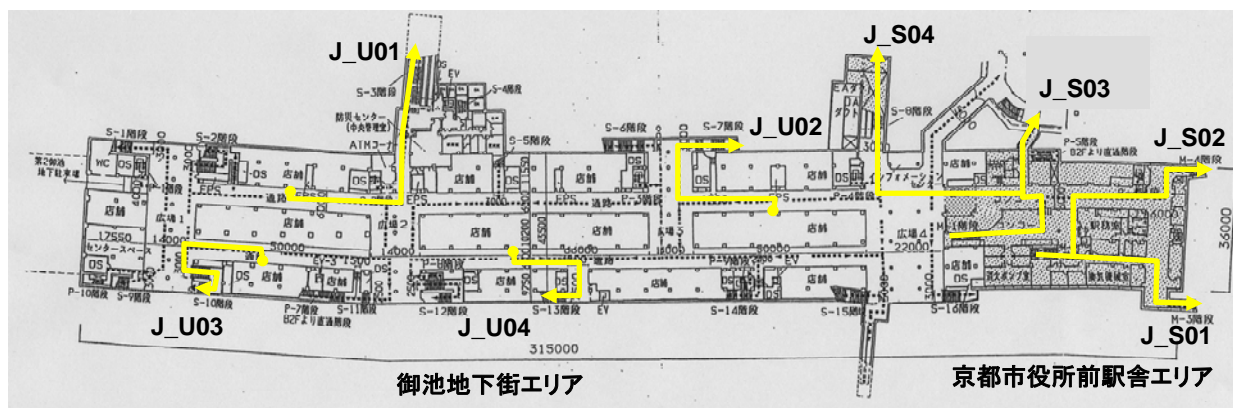


図 2-11 調査対象空間における避難経路の進行方向（御池地下街および京都市役所前駅舎）<sup>15)</sup>



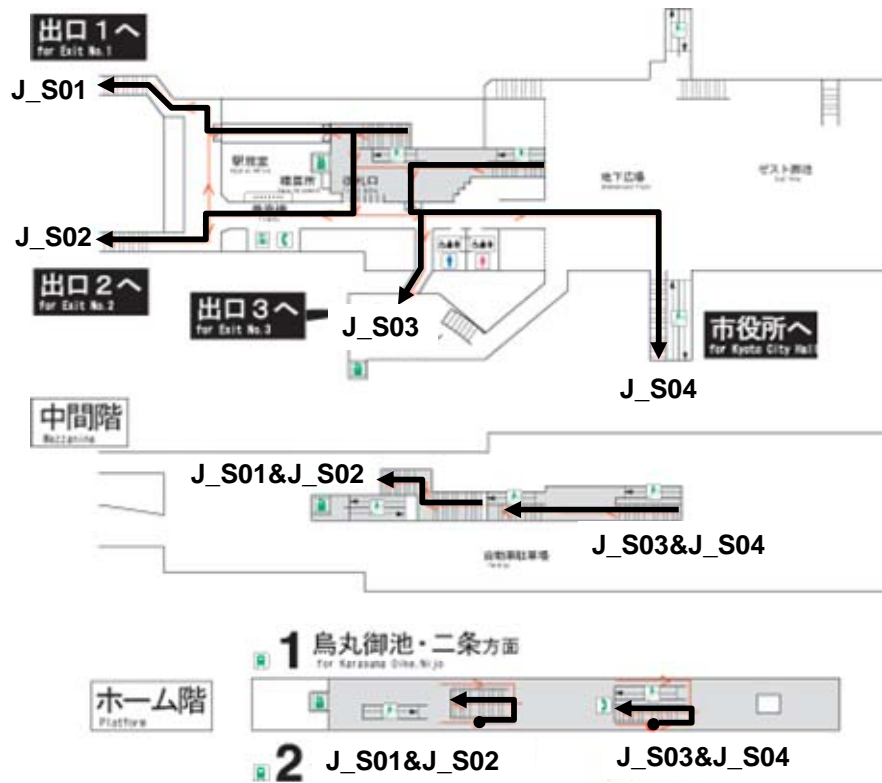


図 2-12 調査対象空間における避難経路の進行方向（京都市役所前駅舎）<sup>16)</sup>

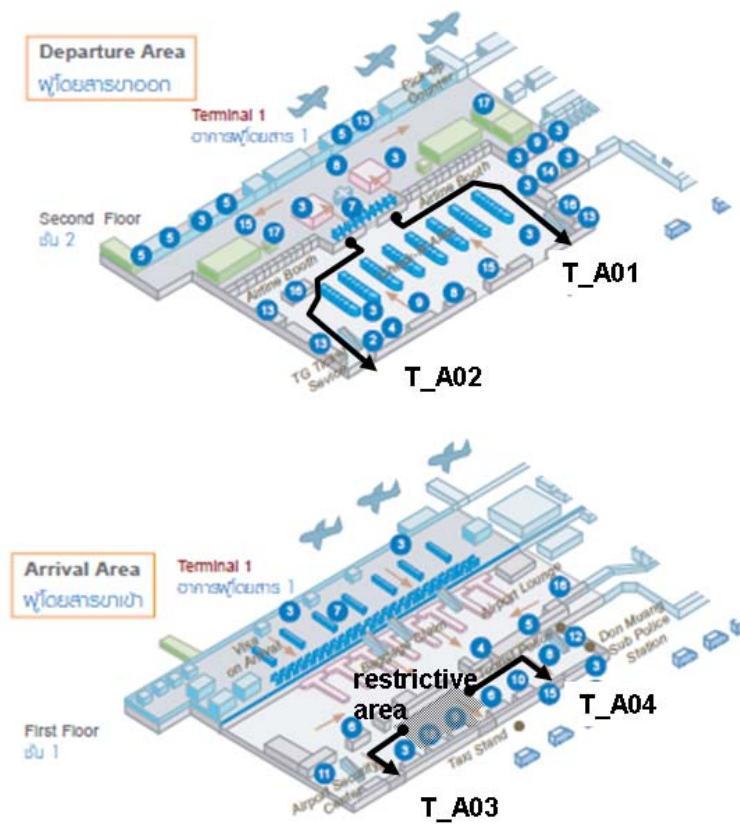
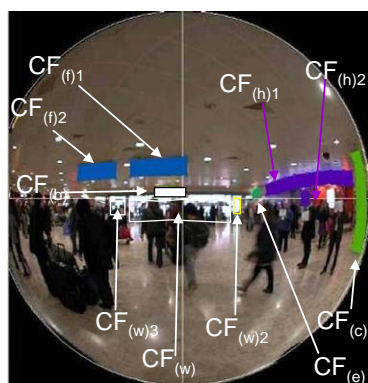


図 2-13 調査対象空間における避難経路の進行方向（DMK、Thailand）<sup>17)</sup>

魚眼レンズを装着したデジタルカメラで視野画像撮影を行い、撮影画像に存在する全てのサインの立体角投射率を算出してそれらをSign(A)～Sign(C)に分類した(図 2-14)。分類にあたり、サインに記載されている文字情報や画像・ピクトグラムを元に、主要な情報が何かを判断して表 2-8 の区分化を行った(例えば、主要な情報が構内案内図であるサインの中に小さな広告が入っている場合、そのサインはSign(B-c)とし、そのサインの全領域の立体角投射率を求める)。またガラス製の窓や扉は、避難先となる施設外  
 の方向や状況を知らせることがあり、避難経路の見通しといった建築的側面<sup>20)</sup>も表すと考えられるので、その立体角投射率 $CF_{window}$ も求めた。



$$\begin{cases} CF_{sign(A)} = CF_{(b)} \\ CF_{sign(B)} = CF_{(c)} + CF_{(e)} + CF_{(f)1} + CF_{(f)2} \\ CF_{sign(C)} = CF_{(h)1} + CF_{(h)2} \\ CF_{windows} = CF_{(w)1} + CF_{(w)2} + CF_{(w)3} \end{cases}$$

図 2-14 各種サインの CF 値算出例

また全ての視野画像撮影点で主観評価実験も行った。各避難経路での被験者人数を表 2-9 右欄に示す。被験者は視野画像撮影時と同じ地点に立ち、撮影時と同じ方向に向いて、下記 3 種の設問に対して該当する評価項目を回答した。どの設問も 4 つの評価項目から成る。全部で 4867 回答のサインの設置状況における主観評価結果を得た。

Q1：避難経路へ誘導する情報は視野内にどの程度あるか？

選択肢：非常に少ない、少ない、適当、多い

Q2：経路探索のノイズとなる情報は視野内にどの程度あるか？

選択肢：非常に少ない、少ない、多い、非常に多い

Q3：出口までの経路が探索しやすいか？

選択肢：非常に難しい、難しい、容易、非常に容易

### 2-3-3. サイン設置状況と経路探索し易さの関係

図 2-15 に出口までの経路の探索し易さと、避難経路を案内する情報および経路探索のノイズとなる情報の量的評価との関係を示す。図中の数字は評価数を表す。

図より出口誘導に関する情報の量的評価と避難経路探索のし易さには強い相関が認められる。一方、誘導を阻害する情報の量的評価と経路探索のし易さには逆相関が認められるものの前者ほど顕著ではない。原因として見通しのような建築的要素が影響したと考えられる。このように空間形状が避難経路探索のし易さに影響して<sup>20)</sup>、単にサイン

情報量だけで解釈できない場合もあるが、概ね情報量で避難経路の探索のし易さが把握できるものと考えられる。

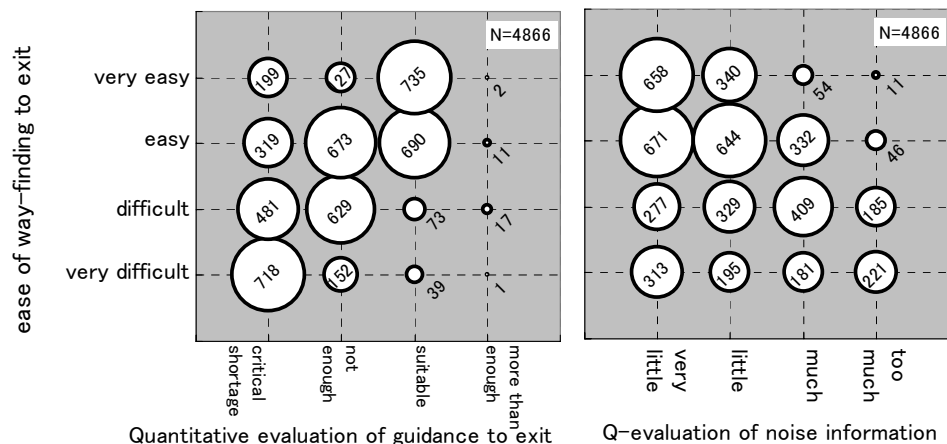


図 2-15 経路探索し易さとサインの量的評価との関係

図 2-16 にサインの立体角投射率 CF と主観評価の関係を示す。縦軸の括弧内数字は、その立体角投射率となった視野画像（評価地点）での評価数を示す。

図 2-16-1 では、Sign(A)の立体角投射率と出口への誘導サインの充足度評価の関係を示している。視野におけるSign(A)の立体角投射率はそもそも非常に小さく殆どが 0.01 以下であるが、その立体角投射率が増加すると出口へ誘導する情報量が「適当」と感じる評価の割合も増加する傾向が見られる。一方、Sign(C)は視野に占める割合も大きく、その立体角投射率の増加に伴い経路探索のノイズと感じる割合も増加し、CF<sub>sign(C)</sub>が 0.12 以上になると約 80%の人が経路探索に対するノイズが多いと感じる(図 2-16-2)。図 4-16-3 では窓の立体角投射率と経路探索のし易さの関係を示しており、窓の立体角投射率が 0.10 以下では、それが小さくなるほど経路探索が難しくなる傾向が見られる。すなわち、窓の少ない閉鎖的な空間は経路探索に影響を与えると考えることができ、窓の立体角投射率が探索し易さの一つの指標になりうると考えられる。なお全てのサインの立体角投射率 (CF<sub>Sign(A)</sub>+CF<sub>Sign(B)</sub>+CF<sub>Sign(C)</sub>)が増加すると、経路探索が困難になる傾向が図 4-16-4 に示されており、単にサインを多く設置すれば良いものではなく、計画的なサイン配置が重要であることが明らかになった。

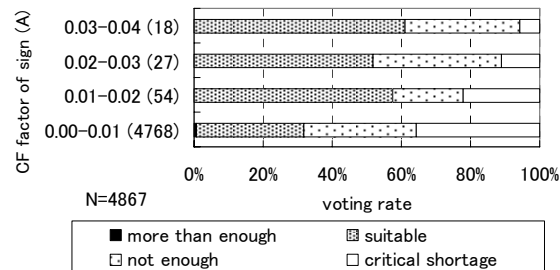


図 2-16-1 Sign (A) の立体角投射率と出口への誘導サインの充足度評価

図 2-16 サインの立体角投射率と主観評価との関係 (1)

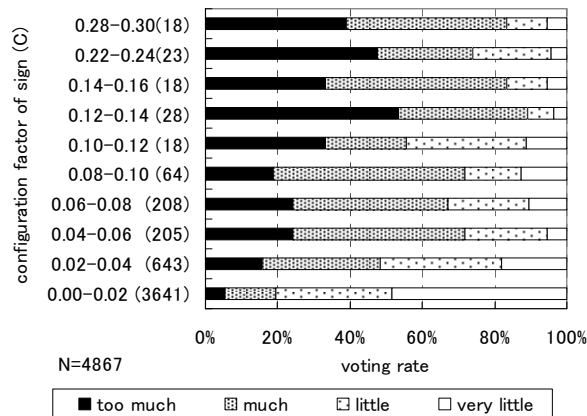


図 2-16-2 Sign (C) の立体角投射率と誘導を阻害するサインの存在感評価

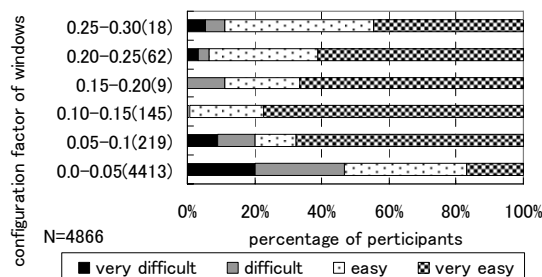


図 2-16-3 窓の立体角投射率と経路探索のし易さ

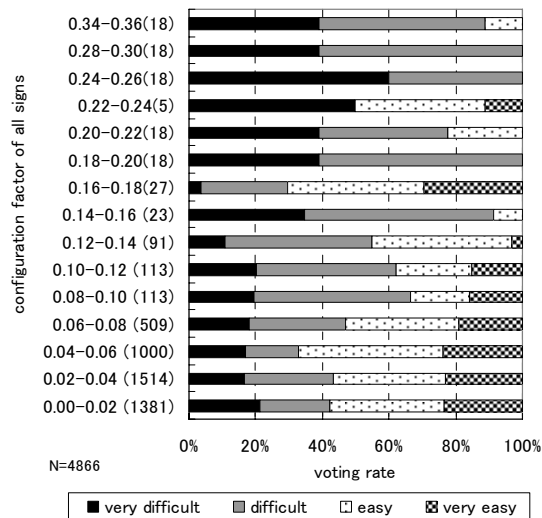


図 2-16-4 経路探索のし易さと全サイン立体角投射率の合計 (Sign (A) + Sign (B) + Sign (C))

図 2-16 サインの立体角投射率と主観評価との関係 (2)

#### 2-3-4. サインの立体角投射率に基づく経路探索し易さの予測式

評価のカテゴリの等間隔性は確認されておらず、カテゴリを置き換えた数字での演算処理は適切ではない。そこで視野画像の立体角投射率の状態に対して出口への経路探索が「容易 easy」「非常に容易 very easy」と評価した人数の割合  $ER$  [%]を目的変数とし、Sign(A), Sign (B), Sign (C)の立体角投射率および窓の立体角投射率を説明変数とし

て SPSS10.0.7J を用いて重回帰分析を行った。このとき、視野画像の立体角投射率は、Sign(A)は 0.01 間隔、Sign(B) と Sign(C)は 0.02 間隔、昼光窓は 0.05 間隔のグリッドに仕分けて、それぞれの間隔の中間値をその Sign の立体角投射率として処理した。表 2-10 にサインの立体角投射率と経路探索し易さ評価の重回帰解析に用いたデータの分布を示す。実験室実験と異なり実際の避難経路を用いて評価しているためデータの分布は不均一であり、非常に小さい CF 値の条件での評価数が多くなっている。

まず重回帰式 2-4 を設定し、重回帰分析の強制投入法を用いて、式の定数と相関係数求めた。結果を表 2-11 に示す。Sign(A)の立体角投射率 $CF_{sign(A)}$ 、またはSign(B)の立体角投射率 $CF_{sign(B)}$ のみから成る式(1)および式(2)は、相関係数が非常に小さく成立しない。Sign(C)の立体角投射率 $CF_{sign(C)}$ 、または窓の立体角投射率 $CF_{window}$ のみから成る式(3)および式(4)は十分な相関係数が得られていない。2 変数から成る式(5)から式(10)では、Sign(C)と窓の立体角投射率が関与する式(10)の相関係数が比較的高いが、十分とはいえないものである。最も相関係数が高くなったのは、全ての変数を回帰式に投入した式(15)であった。

$$ER = \alpha \times CF_{sign(A)} + \beta \times CF_{sign(B)} + \gamma \times CF_{sign(C)} + \delta \times CF_{window} + \varepsilon \quad \text{式 2-4}$$

表 2-11 重回帰式の定数と相関係数

Equation No.	variable				correlation coefficient	constant				
	$CF_{sign(A)}$	$CF_{sign(B)}$	$CF_{sign(C)}$	$CF_{sign(window)}$		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\varepsilon$
1	○	-	-	-	0.027	957.077	-	-	-	50.816
2	-	○	-	-	0.001	-	27.272	-	-	56.797
3	-	-	○	-	0.449	-	-	-389.09	-	78.131
4	-	-	-	○	0.306	-	-	-	307.054	38.247
5	○	○	-	-	0.028	457.777	27.955	-	-	49.682
6	○	-	○	-	0.468	787.675	-	-385.59	-	72.121
7	○	-	-	○	0.345	1150.635	-	-	313.631	29.312
8	-	○	○	-	0.451	-	-41.544	-391.69	-	79.945
9	-	○	-	○	0.333	-	166.644	-	329.744	30.103
10	-	-	○	○	0.551	-	-	-311.82	192.416	61.799
11	○	○	○	-	0.469	785.547	-40.358	-388.13	-	73.899
12	○	○	-	○	0.374	1169.286	169.504	-	336.956	20.833
13	○	-	○	○	0.578	947.166	-	-304.33	200.583	58.878
14	-	○	○	○	0.555	-	59.348	-303.63	203.557	58.262
15	○	○	○	○	0.582	960.483	65.473	-295.19	212.989	49.865

最終的に、サインの立体角投射率から経路探索し易さを予測する式 2-5 を得た。この式の妥当性を示す相関係数は $R^2=0.582$  であり、十分説明できるものとはいえない。その理由の一つとして、全てのCF値が最も小さい視野画像が全評価の約 1/3 を占めるといったように、それぞれのサイン条件の回答数が異なったことが考えられる。また側壁面に設置されることが多い配置図などのSign(B)は、視線方向を固定し立体角投射率で取り扱う場合には視野周辺部で圧縮されるが、頭を振って観察する場合はその限りでなく、立体角投射率よりも立体角で表現した方が適している場合がある。本実験では防災計画書の避難経路に準じて視線方向を出口にむけて固定し、視野画像撮影と同じ視線方

向に被験者を設定して評価させているので、サイン量を立体角投射率で取り扱うことは基本的に問題ないが、被験者によっては評価時に視線方向を少し動かして評価した可能性もあり、それらが回帰式の精度へ影響したことも考えられる。しかし今回構築した式 2-5 を用いることで、サインの設置状況に基づく経路探索のし易さを予測することが可能となり、避難経路のサイン計画に示唆を与えることができると考える。

$$ER = 960.483 \times CF_{sign(A)} + 65.473 \times CF_{sign(B)} - 295.187 \times CF_{sign(C)} + 212.989 \times CF_{window} + 49.865$$

scope of variable ;  $0 \leq CF_{sign(A)} \leq 0.038$ ,  $0 \leq CF_{sign(B)} \leq 0.220$ ,  $0 \leq CF_{sign(C)} \leq 0.300$ ,  $0 \leq CF_{window} \leq 0.768$  式 2-5

表 2-10 サインの立体角投射率と経路探索し易さ評価の重回帰分析に用いたデータの分布

CF <sub>sign(A)</sub>	CF <sub>sign(B)</sub>	CF <sub>sign(C)</sub>	CF <sub>window</sub>	evaluation; ease of way-finding to exit				ER [%]
				very difficult	difficult	easy	very easy	
0.00-0.01	0.00-0.02	0.00-0.02	0.0-0.05	336	399	583	318	55.1
			0.05-0.1			13	74	100.0
			0.1-0.15			12	38	100.0
			0.2-0.25	1	1	8	17	92.6
			0.25-0.3	1	1	8	8	88.9
		0.02-0.04	0.0-0.05	109	158	136	54	41.6
			0.05-0.1	10	13	5	4	28.1
			0.1-0.15			1	4	100.0
		0.04-0.06	0.0-0.05	19	40	55	10	52.4
			0.05-0.1	7	2	1	4	35.7
		0.06-0.08	0.0-0.05	30	40	10	2	14.6
		0.08-0.10	0.0-0.05	18	27	1		2.2
		0.12-0.14	0.0-0.05	5	5			0.0
		0.22-0.24	0.0-0.05	3	2			0.0
	0.02-0.04	0.00-0.02	0.0-0.05	169	156	333	157	60.1
			0.05-0.1	1	4	4	27	86.1
			0.1-0.15				36	100.0
			0.15-0.2		1	2	6	88.9
			0.2-0.25	1	1	7	9	88.9
		0.02-0.04	0.0-0.05	1	21	37	13	69.4
			0.05-0.1	2	5	4	7	61.1
		0.04-0.06	0.0-0.05	4	1			0.0
		0.06-0.08	0.0-0.05	8	29	9	8	31.5
		0.10-0.12	0.0-0.05	1	7	1		11.1
	0.04-0.06	0.00-0.02	0.0-0.05	7	9	2		11.1
			0.00-0.02	87	117	253	109	64.0
			0.05-0.1				23	100.0
			0.1-0.15			17	19	100.0
		0.02-0.04	0.0-0.05	2	7	18	18	80.0
		0.04-0.06	0.0-0.05	6	21	14	4	40.0
		0.06-0.08	0.0-0.05		14	22		61.1
		0.08-0.10	0.0-0.05	5	11	2		11.1
		0.10-0.12	0.0-0.05			1	8	100.0
		0.22-0.24	0.0-0.05	7	11			0.0
	0.06-0.08	0.00-0.02	0.0-0.05	27	44	77	28	59.7
			0.2-0.25			5	12	100.0
		0.06-0.08	0.0-0.05	7	9	2		11.1
			0.0-0.05	7	11			0.0
		0.08-0.10	0.00-0.02			1	8	100.0
		0.10-0.12	0.00-0.02	11	8			29.6
0.01-0.02	0.00-0.02	0.00-0.02	0.0-0.05	1	3	5		55.6
			0.05-0.1				9	100.0
			0.1-0.15		1	1	7	88.9
		0.02-0.04	0.14-0.16	7	7	4		22.2
		0.08-0.10	0.02-0.04				9	100.0
	0.02-0.03	0.02-0.04	0.00-0.02			1	8	100.0
		0.08-0.10	0.04-0.06	1	7	10		55.6
	0.03-0.04	0.02-0.04	0.06-0.08		6	11	1	66.7

重回帰分析においてステップワイズ法を用いると、説明変数に $CF_{\text{sign}(C)}$ と $CF_{\text{window}}$ 以外は除去された。しかし $\text{Sign}(A)$ に該当する避難口誘導灯などは、公共建築では必ず設置されるものであり、前出 2-3-3 において、 $CF_{\text{sign}(A)}$ が大きくなるほど経路探索に必要な情報量が十分と感じて探索し易くなることが示されていたことを考えると、予測式に必要な変数と考える。また $\text{Sign}(B)$ も建物が大きく複雑になれば必ず設置される重要なサインであるが、 $\text{Sign}(B)$ を含む全てのサイン量が多くなると経路探索がしにくくなることを前出 2-3-3 で示しているので、やはり予測式に必要な変数であると考え。それ故、本論文では最終的に式 2-5 を提案している。今後さらに様々なサイン設置状況での評価データを加えて、この式の精度を上げることが望まれる。

主観評価実験を行った避難経路について、5m 間隔で撮影した視野画像の各種サイン立体角投射率と経路探索のし易さの結果を図 2-17 から図 2-20 に示す。立体角投射率は網部の高さで表されている。すなわち、積み上げられた曲線の最上部の数値が、その地点の視野の総サイン情報量を意味している。さらに図中 2 種類の折れ線は、出口の見つけやすさの度合いを意味し、黒色折れ線は式 2-5 によって予測された評価率 ( $P\text{-}ER$ )、灰色折れ線は実際に視野画像撮影地点で評価した被験者の評価結果 ( $A\text{-}ER$ ) を表す。

図 2-19 の一部では予測値  $P\text{-}ER$  と実際の評価値  $A\text{-}ER$  の対応が良い結果が見られるが、多くの結果で一致していないのは、予測式での  $ER$  算出と比べて、ルートそれぞれの被験者数が圧倒的に少ないことが考えられる。特に図 2-20 の DMK 国際空港での避難経路では被験者が 5 人と非常に少ないので、本来  $ER$  を計算することはできない状態にある。出口に近づくにつれて、 $P\text{-}ER$  と  $A\text{-}ER$  が値は異なるものの同じような定性的傾向を示す部分も見られ、予測式に表れていた窓（外部情報が入手できる部分）の評価への効果が表れているとも考えられる。一方、測定開始部分（出口から遠い空間の深部）では、 $A\text{-}ER$  が低いのにに対して予測値  $P\text{-}ER$  が高い部分も多い。

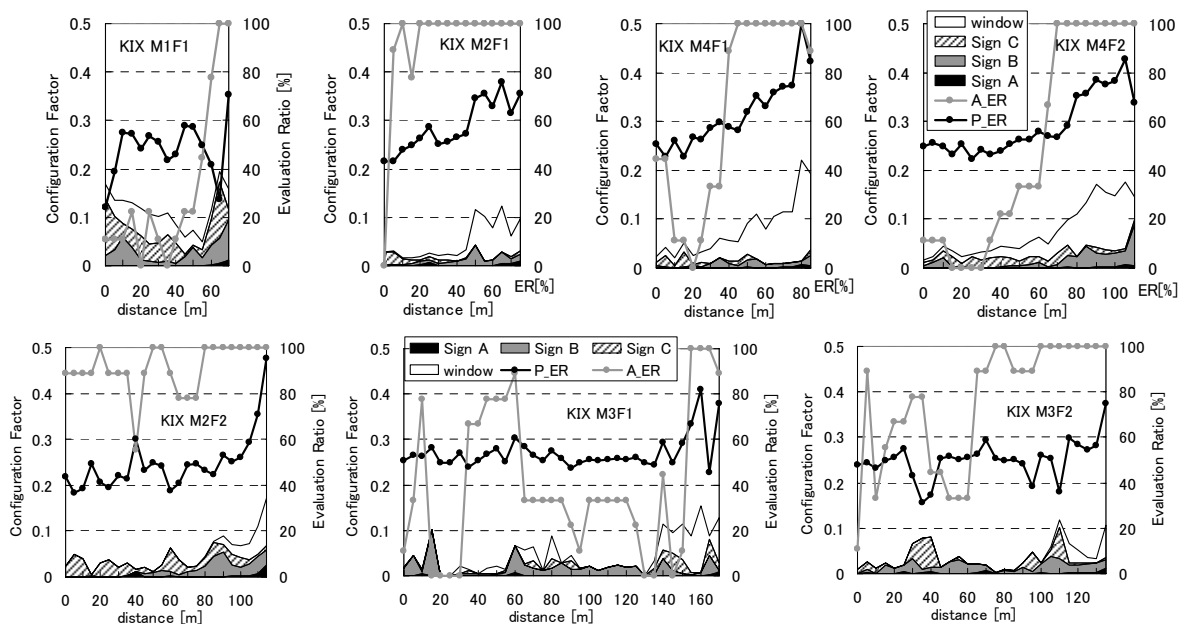


図 2-17 避難経路のサイン設置状況（国際空港 KIX、日本）

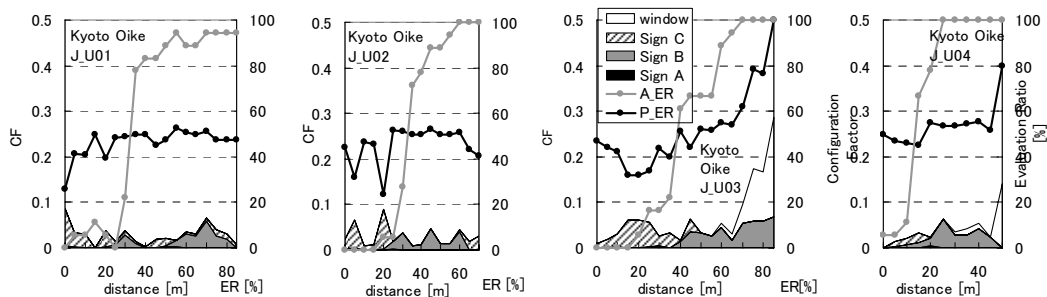


図 2-18 避難経路のサイン設置状況（京都御池地下街、日本）

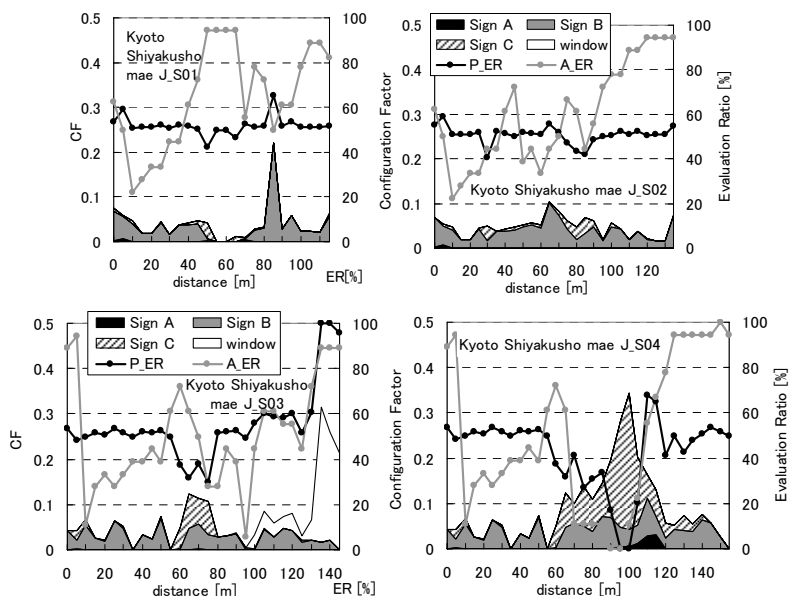


図 2-19 避難経路のサイン設置状況（京都市営地下鉄駅舎、日本）

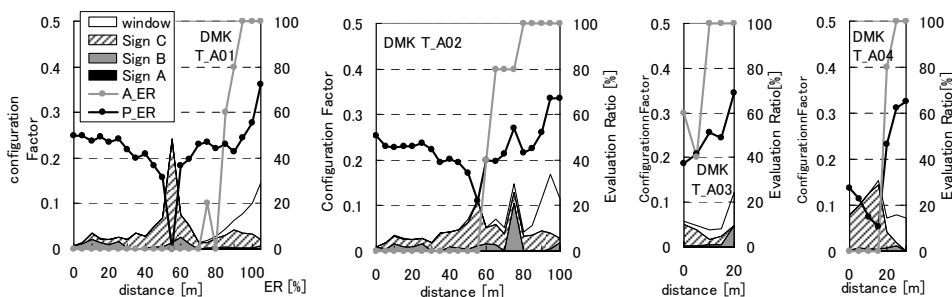


図 2-20 避難経路のサイン設置状況（国際空港 DMK、タイ）

火災安全設計の原則では、避難者が十分に思慮する時間がなくとも、反射的な行動で安全に避難できるために、建築空間は階層のはっきりした明快な空間構成が求められる<sup>21)</sup>。しかし建築物が大規模になると、平面上に分岐点が多く存在するようになり、サインなしでは避難経路を見失うことが十分考えられる。そこで、避難経路が一方向である視野画像 93（図 2-21）、避難出口が一見で分かる視野画像 297（図 2-22）および分岐点のように避難経路が複数ある又は空間が複雑で経路が分からない視野画像 218（図



2-23) の3種類に分けて結果を再集計し、視野画像の各サインの立体角投射率の状態に応じて $ER[\%]$ を求め、表 2-11 に示す。表中のNは4種類のサイン立体角投射率の組合せ条件における全評価人数を表しており、その内、出口への経路探索が「容易」及び「非常に容易」と評価した人数の割合が $ER$ となる。



図 2-21 避難経路が一方方向の例



図 2-22 避難出口が明確な例



図 2-23 複数避難経路がある例

経路 J\_S01 地点 55m

経路 M4F1 地点 50m

経路 J\_U04 地点 10m

表 2-11 経路の特徴別に分類したサインの立体角投射率と経路探索し易さ評価 ER の分布

出口が明確な場合

CFsign(A)	CFsign(B)	CFsign(C)	CFwindow	N	ER[%]
0.00-0.01	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	211	91.94
			0.05-0.10	51	100
			0.10-0.15	41	100
			0.20-0.25	27	92.59
			0.25-0.30	18	88.89
		0.02-0.04	0.00-0.05	31	96.77
			0.05-0.10	5	100
			0.10-0.15	5	100
		0.04-0.06	0.05-0.10	5	100
	0.02-0.04	0.00-0.02	0.00-0.05	216	93.52
			0.05-0.10	18	100
			0.10-0.15	36	100
			0.15-0.20	9	88.89
			0.20-0.25	18	88.89
0.01-0.02	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	143	94.41
			0.05-0.10	14	100
			0.10-0.15	36	100
		0.02-0.04	0.00-0.05	27	96.3
			0.10-0.12	9	100
	0.06-0.08	0.00-0.02	0.00-0.05	54	96.3
			0.20-0.25	17	100
0.02-0.03	0.02-0.04	0.00-0.02	0.00-0.05	9	100
			0.10-0.15	9	100

一方向しか経路がない場合

CFsign(A)	CFsign(B)	CFsign(C)	CFwindow	N	ER[%]
0.00-0.01	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	522	58.62
			0.05-0.10	18	100
		0.02-0.04	0.00-0.05	54	66.67
			0.04-0.06	9	88.89
	0.02-0.04	0.00-0.02	0.00-0.05	387	49.35
			0.05-0.10	9	100
	0.04-0.06	0.00-0.02	0.00-0.05	9	100
			0.06-0.08	18	27.78
0.01-0.02	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	225	61.33
			0.06-0.08	86	45.35
0.02-0.03	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	9	0

複数経路がある場合

CFsign(A)	CFsign(B)	CFsign(C)	CFwindow	N	ER[%]
0.00-0.01	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	903	44.4
			0.05-0.10	18	100
			0.10-0.15	9	100
		0.02-0.04	0.00-0.05	372	33.3
			0.05-0.10	27	14.8
		0.04-0.06	0.00-0.05	115	49.6
			0.05-0.10	9	0
		0.06-0.08	0.00-0.05	82	14.6
			0.08-0.10	46	2.17
		0.12-0.14	0.00-0.05	10	0
			0.22-0.24	5	0
	0.02-0.04	0.00-0.02	0.00-0.05	212	45.8
			0.05-0.10	9	44.4
		0.02-0.04	0.00-0.05	63	65.1
			0.05-0.10	18	61.1
		0.04-0.06	0.00-0.05	5	0
			0.06-0.08	36	33.3
		0.10-0.12	0.00-0.05	9	11.1
			0.28-0.30	18	11.1
0.01-0.02	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	198	44.9
			0.05-0.10	9	100
		0.02-0.04	0.00-0.05	18	55.6
			0.04-0.06	45	40
		0.06-0.08	0.00-0.05	36	61.1
			0.08-0.10	18	11.1
		0.22-0.24	0.00-0.05	18	0
	0.06-0.08	0.00-0.02	0.00-0.05	36	38.9
			0.06-0.08	18	11.1
		0.12-0.14	0.00-0.05	18	0
0.02-0.03	0.00-0.02	0.00-0.02	0.00-0.05	18	44.4
			0.02-0.04	5	80
		0.02-0.04	0.00-0.05	18	50
0.03-0.04	0.02-0.04	0.06-0.08	0.00-0.05	18	22.2
			0.04-0.06	18	55.6

表 2-11 より、視野画像において出口が明確な避難経路では、サインの立体角投射率に関わらず殆どの条件で  $ER > 88\%$  となっており、サインによる誘導効果が少ないことを示している。視野画像において一方向しか経路がない場合は、サインの立体角投射率の状態によって  $ER$  が変化しているが、立体角投射率の組合せ条件数が限られており、またそれぞれの全評価人数  $N$  が極端に異なるため、重回帰分析を行うのに十分なデータとはいえない。視野画像において複数避難経路がある場合は、立体角投射率の組合せ条件数が多く、全評価人数  $N$  も各組合せにおいて一定数以上存在するので、この結果について重回帰分析を行った。

重回帰分析の結果、得られた予測式を式 2-6 に示す。なお重回帰分析においてステップワイズ法を用いると、説明変数として  $CF_{sign(C)}$  以外は除去されたので、強制投入法を用いた。式の立体角投射率毎の係数における大小関係は、前述式 2-5 と同様の傾向を示しているが、式の相関係数は  $R^2 = 0.498$  であり、全ての結果を用いて導入した式 2-5 に比べると低い値となっている。今回の複数避難経路がある結果だけでは十分な立体角投射率の組合せ条件を確保できていなかったことが考えられるため、全ての避難経路での結果を用いて様々なサイン状況について評価された結果に基づき構築した式 2-5 を用いる方が適しているといえる。

$$ER = 1128.535 \times CF_{sign(A)} + 112.637 \times CF_{sign(B)} - 202.628 \times CF_{sign(C)} + 443.522 \times CF_{window} + 22.395$$

$$\text{scope of variable ; } 0 \leq CF_{sign(A)} \leq 0.031, 0 \leq CF_{sign(B)} \leq 0.220, 0 \leq CF_{sign(C)} \leq 0.300, 0 \leq CF_{window} \leq 0.148 \quad \text{式 2-6}$$

本章では、避難者が避難経路を移動する際に視野に入るサイン量として、立体角投射率を取り上げ、測定方法を構築し、経路探索し易さ評価との関係について検討した。今後は、十分な被験者数とサインの立体角投射率の組合せ条件数を準備した上で予測式の精度を上げるだけでなく、避難者が視線を左右に振りながら経路探索する場合を想定し立体角を用いて経路探索し易さ評価との関係を検討するなど、多角的な追加検討が必要であると思われる。

## 2-5. まとめ

本章第二項において、我が国の国際空港における代表的な避難経路について実測調査を行い、視野画像におけるサインの立体角投射率を用いたサイン設置状況の把握方法について検討した。結果、避難時のサインとして設置されている通路誘導灯や避難口誘導灯は視野内に殆ど存在しておらず、広告の立体角投射率が他のサインと比較して非常に大きな面積を占めることがわかり、避難誘導の観点に立った屋内広告規制の必要性が明らかになるなど、立体角投射率によるサイン設置状況の把握方法の有効性を示した。また避難経路 1.0 [m] 間隔で得られた各種データを元に、測定間隔を最大 10[m] まで 1.0[m] 毎に拡張させた時に、1.0 [m] 間隔の測定結果とどの程度異なるか検討し、測定間隔を 5.0[m] まで長くしても、全体の傾向は 1.0[m] 間隔で測定した結果と

同等に扱えることを示した。本項で示したこれらの知見は、経路探索におけるサイン情報量の把握や室内空間の照度分布測定など、目的の異なる実態調査を行う上でも有効なものであると考える。

また本章第三項では、前項で構築したサイン設置状況の把握方法を用いて、日本とタイにある国際空港や主要地下鉄駅舎等の避難経路について実態調査および評価実験を行い、視野のサインの立体角投射率に基づく避難経路の探索し易さの予測について検討した。避難経路を直接誘導するサインや、広告等の経路探索時のノイズとなるサインの立体角投射率が経路探索し易さに対して影響することや、視野内の総サイン立体角投射率が大きくなると経路探索が困難になることを把握し、計画的なサイン配置が重要であることを示した。そして重回帰分析を行い、各種サインの立体角投射率に基づく避難経路探索し易さの予測式を得た。

$$ER = 960.483 \times CF_{sign(A)} + 65.473 \times CF_{sign(B)} - 295.187 \times CF_{sign(C)} + 212.989 \times CF_{window} + 49.865$$

$$scope\ of\ variable ; 0 \leq CF_{sign(A)} \leq 0.038, 0 \leq CF_{sign(B)} \leq 0.220, 0 \leq CF_{sign(C)} \leq 0.300, 0 \leq CF_{window} \leq 0.768$$

その精度は現時点で十分なものとは言えないが、避難経路のサイン計画に示唆を与えることができると考える。

**注：**

- 注1) 人間の眼球の両眼視野は、上限 55 度、下限 80 度、左右 95 度であるの範囲が最大であるが、通常の視角は上下左右に約 30 度程度である。
- 注2) SPCONV ver.0.6 は日本建築学会熱環境シミュレーション小委員会のホームページで公開されている、魚眼レンズ撮影画像データの射影方法を変更するプログラムである。
- 注3) 歩行速度は建築物または居室の用途、また階段か否かによって異なり、避難安全検証法に関する国土交通省告示第 1441 号および第 1442 号において定められている。また避難出口では流出速度に限りがあるため、避難者が滞留することとも考慮して、避難時間を算出する。

**参考文献：**

- 1) 松浦邦男：建築照明、共立出版、1971
- 2) 人間工学入門：人間工学教育研究会編、日刊工業新聞社、1983
- 3) 日本建築学会編：建築設計資料集成 人間、丸善、2003
- 4) (社)日本火災学会編：はじめて学ぶ建築と火災、共立出版、2007
- 5) 秋月有紀・岩田三千子・奥田紫乃・田中哮義：立体角投射率を用いた避難経路のサイン設置状況の把握 円滑な避難誘導のための視環境計画に関する研究その 1、日本建築学会環境系論文集、Vol.74、No.641、pp.767-773、2009.7

- 6) 永田明寛：SPCONV ver.0.6、"BUILDING SIMULATION RESOURCES Library, Application and Database", (online), available from <<http://news-sv. aij.or.jp/kankyo/s12/Resource/ap/SPCONV/SPCONV.htm>>, (accessed 2009-04-07)
- 7) 渡邊昭彦・森一彦：サイン情報の情報密度と探索行動のばらつき度の関連分析 建築空間における探索行動の認知心理学的考察その1、日本建築学会計画系論文報告集、No.437、pp.77-86、1992.7
- 8) 田中哮義：改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、2002
- 9) 田中直人・岩田三千子：サイン環境のユニバーサルデザイン 計画・設計のための108の視点、学芸出版社、1999
- 10) Graphical symbols - Safety signs - Safety way guidance system : ISO 16069、2004
- 11) 平成18年空港管理状況調書：国土交通省航空局
- 12) Japanese Body Size Data 1992-1994: Research Institute of Human Engineering for Quality life、2003
- 13) Graphical symbols - Safety colours and safety signs -Part 1: Design principles for safety signs in workplaces and public areas : ISO 3864-1、2002
- 14) 安全色-一般的事項：JIS Z-9103、2005
- 15) Lighting of indoor work places : CIE Standard S008/E、2001
- 16) Yuki AKIZUKI, Shino OKUDA, Michico IWATA and Takeyoshi TANAKA、Evaluation Method for Easy Wayfinding of Escape Routes by Configuration Factor, Study on Visual Environment Designs for Smooth Evacuation Guidance No.2、日本建築学会環境系論文集、Vol.77、No.674、頁未定、2012年4月（掲載決定）
- 17) 京都御池地下街株式会社：京都御池地下街設置計画書（詳細協議資料）京都市、1995
- 18) 京都市交通局、京都市役所前駅避難経路図
- 19) Bangkok Don Mueang Airport Map [http://www2.airportthai.co.th/donmueang/en/pdf/bangkokmap\\_detail.pdf](http://www2.airportthai.co.th/donmueang/en/pdf/bangkokmap_detail.pdf) (accessed 2011-11-28)
- 20) Chengyu Sun, Architectural Cue Model in Evacuation Simulation for Underground Space Design, Faculteit bouwkunde of Technische Universiteit Eindhoven, 2009
- 21) 日本建築学会防火委員会火災安全設計小委員会：火災安全設計の原則、シンポジウム「火災安全設計の原則」と「火災荷重・設計火災性状」資料、2011

## 第3章 円滑な避難誘導へ配慮したサイン整備

### 3-1. はじめに

近年、鉄道駅舎や国際空港ターミナルといった不特定多数の人々が行き交う公共交通施設は、乗り継ぎ路線の拡大や国際競争強化に対するハブ化などに伴って、大規模かつ複雑化の一途をたどっている。これらの建築物は、我が国において性能評価に基づく火災安全設計がなされているが、その中で視認性に基づく避難誘導への配慮については避難誘導灯の配置以外に十分検討されていないのが現状である。

我が国では2007年1月に観光立国推進基本法が施行され、日本の重要な政策の柱として観光が位置付けられており、京都市のような観光資源の豊富な歴史的都市には多くの外国客を含む観光客が押し寄せている。ひとたび大規模災害時が発生したとき、この観光客は帰宅困難者となり都市内に滞留してしまうが、これら観光客を自らの足で広域避難場所へ円滑に避難誘導することは、災害対策本部の負担を少しでも軽減する意味でも必須の課題である。

そこで本章では、建築都市空間において、円滑に避難誘導を行うためのサイン整備について実態調査を踏まえて考察し課題について述べる。

### 3-2. 公共交通施設内部の避難経路におけるサイン整備の現状と課題<sup>1)2)</sup>

施設を熟知した人が多数を占める事務所ビル等と比較して、不特定多数の人間が利用する公共交通施設では、災害時を想定して避難経路における避難出口までの誘導が効果的に行われたサイン整備がなされるべきである。そもそも我が国では広告物に関する掲出規制が欧米各国に比べて非常に希薄であり、伝統的建築群保存地区などの景観保全地域において屋外広告物規制が行われているものの、建築空間内部では殆ど規制がなく、公共交通施設であっても無秩序に広告物が設置されているのが現状である。これら広告物は避難経路探索に影響を及ぼすことは既に前章で示したが、その問題点を上げて適切な避難誘導サイン計画を行った事例は殆ど存在しておらず、建築空間内部における広告物規制の必要性も話題に上がってきてはいない。

そこで本項では、前章で構築したサインの立体角投射率に基づく経路探索し易さの予測式を用いて、各国の公共交通施設の避難経路のサイン整備状況について国際比較を行い、我が国の公共交通施設のサイン整備について現状の問題点と課題を示す。

#### 3-2-1. 調査概要

公共交通施設として、国内外の国際空港ターミナル4ヵ国5施設と地下鉄駅舎5ヵ国8施設を調査対象とし、2005～2007年に実施した。

##### 3-2-1-1. 調査対象1：国際空港ターミナル

国際空港ターミナルの調査は日本(空港コード KIX)、Thailand (DMK、BKK)、France (CDG\_第2ターミナル F)、Hong Kong (HKG)であり、この中でBKK国際空港は2006

年 9 月 28 日に開港した、最も新しい空港である。調査対象について概要を表 3-1 に示す。また国際空港ターミナルの平面図を図 3-1 から図 3-3 に示す。国際空港の KIX と DMK の平面図は前章図 2-2 および図 2-9 であり、それぞれ避難経路番号が対応する。

表 3-1 調査対象の国際空港ターミナル一覧

country	airport	route	point, distance[m]	country	airport	route	point, distance[m]
Japan	KIX, Osaka Kansai (2005/12, 2006/01)	M1F1	int. arrival S 70	Thailand	DMK, Don Muang (2006/08)	T_A01	int. departure E 105
		M2F1	domestic departure 75			T_A02	int. departure W 100
		M2F2	restaurant entrance 115			T_A03	int. arrival W 20
		M3F1	restaurant entrance 170			T_A04	int. arrival E 30
		M3F2	store entrance 135		BKK, Suvarnabhumi (2007/02)	T_A11	int. departure E 90
		M4F1	int. departure N 85			T_A12	int. departure W 100
		M4F2	group waiting area 110			T_A13	int. arrival E 40
France	CDG, Charles de Gaulle (2006/09)	F_A01	int. departure 1 15	Hong Kong	HKG (2006/05)	H_A01	int. departure 130
		F_A02	int. departure 2 15			H_A02	int. arrival 80
		F_A03	int. arrival 1 15				
		F_A04	int. arrival 2 30				
		F_A05	int. arrival 3 15				

int.=international

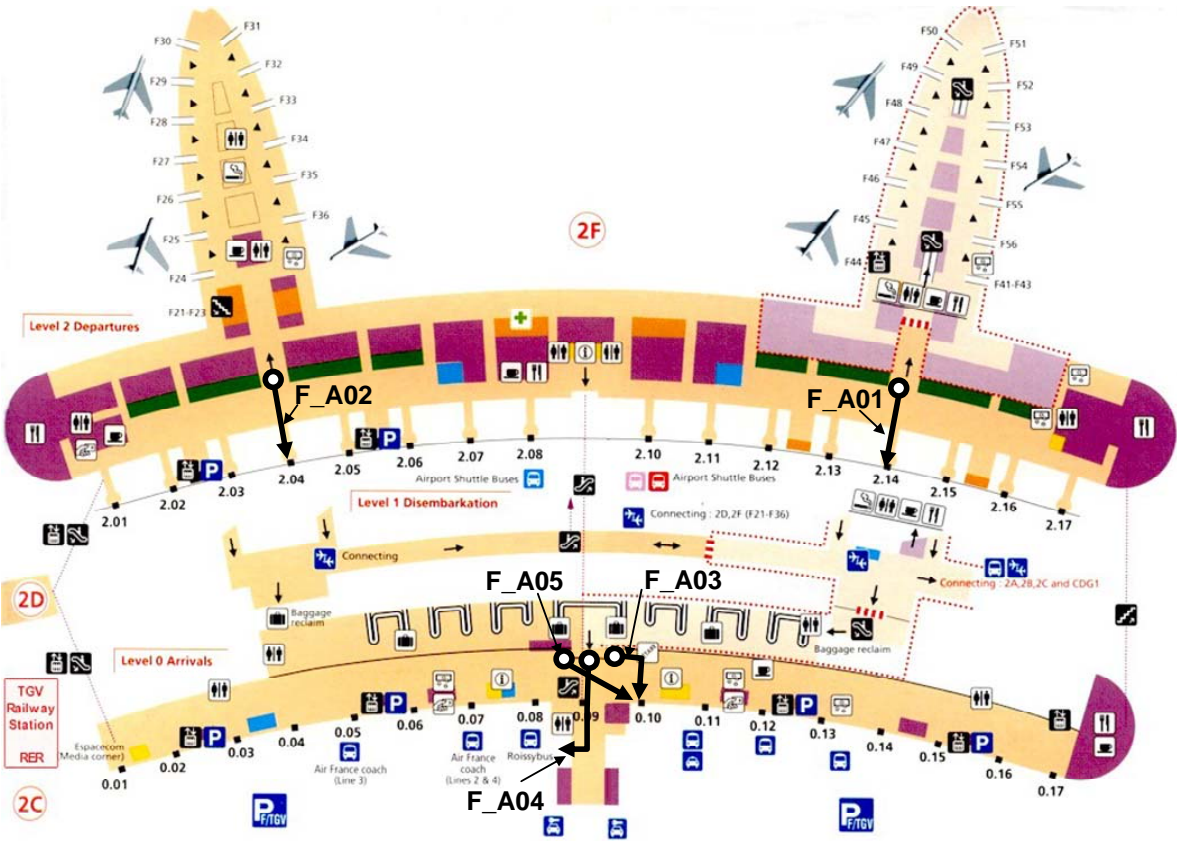


図 3-1 調査対象空間における避難経路の進行方向（CDG、France）<sup>4)</sup>

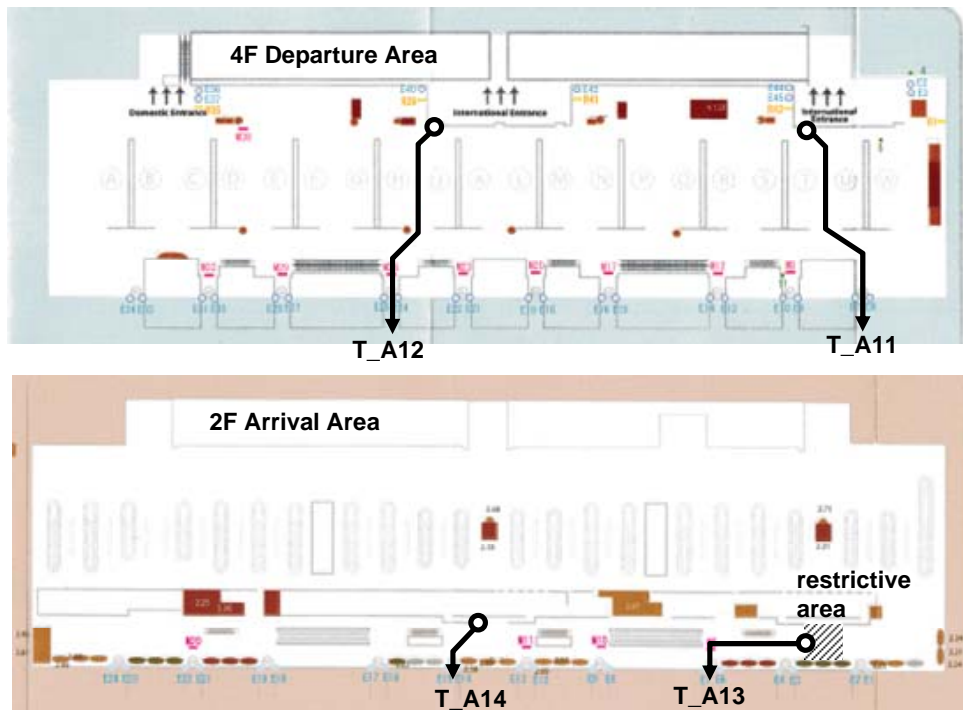


図 3-2 調査対象空間における避難経路の進行方向（BKK、Thailand）<sup>3)</sup>

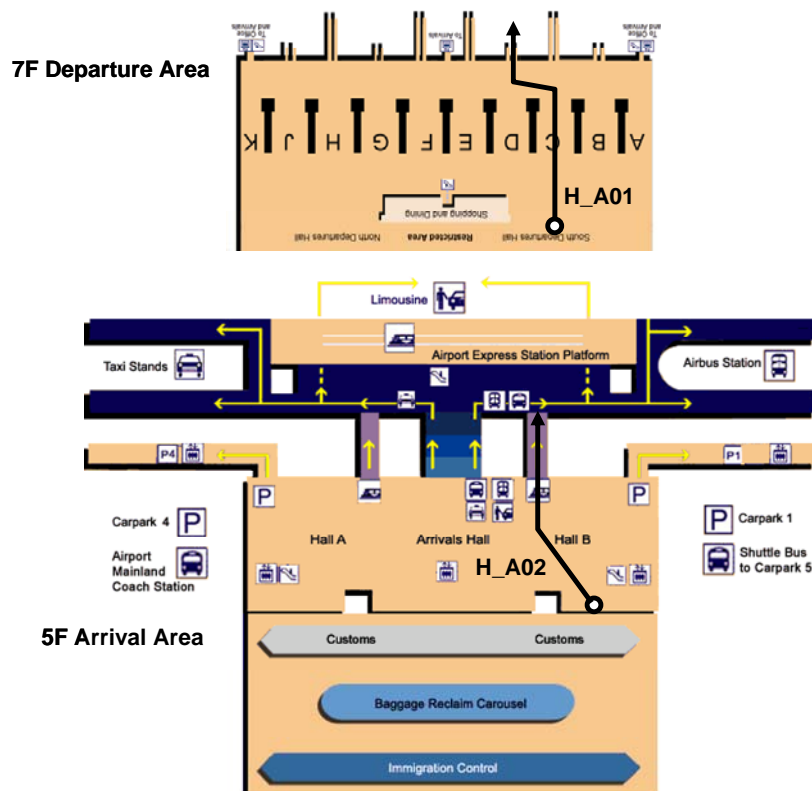


図 3-3 調査対象空間における避難経路の進行方向（HKG、China）<sup>5)</sup>



### 3-2-1-2. 調査対象 1：地下鉄駅舎

地下鉄駅舎の調査は、日本（京都市営地下鉄）、Thailand (Bangkok MRT)、France (Lyon Metro)、Germany (U-Bahn)、Belgium (premetro) について行った。調査対象について概要を表 3-2 に示す。地下鉄駅舎の平面図は、京都市営地下鉄の京都市役所前駅（前章図 2-7 および図 2-8）のみ入手できており、平面図が入手困難なその他の各国地下鉄駅舎については、写真画像を図 3-4 から図 3-10 に示す。

表 3-2 調査対象の地下鉄駅舎一覧

country	city	station	route	point, distance[m]
Japan (2006/07)	Kyoto	Kyoto shiyakusho mae	J_S01	center SE 115
			J_S02	center NE 135
			J_S03	center N 145
			J_S04	center NW 155
Thailand (2007/02)	Bangkok	Skhumvit	T_S01	center 90
		Lat Phrao	T_S11	center 55
		Thai Cultural Center	T_S21	center 80
France (2006/09)	Lyon	Fouviere	F_S01	center 1 40
			F_S02	center 2 65
Belgium (2006/09)	Brussels	Beurs	B_S01	center 60
	Antwerp	Diamant	B_S02	center 120
Germany (2006/09)	Nuremberg	Hauptbahn	G_S01	center 60



図 3-4 調査対象避難経路（Skhumvit、Thailand）左：ホーム、右：改札階駅舎内部



図 3-5 調査対象避難経路（Thai Cultural Center、Thailand）左：改札階、右：改札階外部





图 3-6 調査対象避難経路 (Lat Phrao、Thailand) 左：ホーム、右：改札階駅舎内部



F\_S01 測定起点 (ホーム)      F\_S01 地点 30m      F\_S02 地点 10m (ホーム側道)      F\_S02 地点 60m 改札階

图 3-7 調査対象避難経路 (Fouviere、France)



图 3-8 調査対象避難経路 (Beurs、Belgium) 左：ホーム、右：地点 40m 改札階駅舎内部



图 3-9 調査対象避難経路 (Diamant、Belgium) 左：ホーム、右：地点 60m 改札階駅舎内部



図 3-10 調査対象避難経路（Hauptbahn、Germany）左：地点 15m ホーム、右：地点 30m 改札外部

想定する避難経路は、国際空港の場合は非制限エリア内の出入国ゲートから屋外出口まで、地下鉄駅舎の場合はホーム中央から地上階出口までとし、1.5[m]高さの位置に設定した魚眼レンズ FC-E8 装着のデジタルカメラ Coolpix990(共に Nikon 製)を用いて、避難経路の起点から出口に向かう方向にレンズを設定して 5.0[m]間隔で撮影した。詳細な測定方法については第 2 章に準ずる。

### 3-2-2. 国際空港ターミナルのサイン整備

4 カ国で実施した国際空港ターミナルの避難経路における視野画像のサイン立体角投射率と、それに基づく経路探索し易さの結果を図 3-11 から図 3-15 に示す。各種サインの立体角投射率 CF の算出方法、および立体角投射率 CF に基づく経路探索し易さ P-ER の予測方法は第 2 章に準じる。なお図 3-11 と図 3-12 は、第 2 章図 2-11 および図 2-13 を一部変更（現地での実際の評価結果 A-ER を削除）したものである。図において立体角投射率は網部の高さで表され、黒色折れ線は、前章式 2-5 によって予測された評価率 ER(視野画像の立体角投射率の状態に対して出口への経路探索が「容易」「非常に容易」と評価した人数の割合)を示す。

日本の KIX での結果では、窓の立体角投射率は避難出口に近づくほど大きくなるが、多くの広告物 Sign(C)が存在しているので、避難出口周辺以外の地点の殆どで ER 値は 60%未満となっている。

Thailand の DMK は非常に広告物が多く、避難経路において ER が 40%以下の地点も多く存在していたが、老朽化と更なるハブ空港化を目的として 2006 年 9 月 28 日に主要国際空港の座を BKK へ渡した。この BKK はガラスを多用した非常に開放的な空港となっており、広告物の撤去なども伴って ER 値が非常に高いものとなっている。但し式 2-5 では窓の立体角投射率が ER に大きく影響するので、このようなガラス建築に適用可能か、さらなる検討が必要である。

France の CDG は、経路そのものは短いが各種サインが少なく、ER 値は経路により様々である。香港の HKG は DMK ほどではないものの広告物が多い避難経路となっており、窓の少ない到着ゲートでは避難出口に近づくほど ER 値が低くなる傾向にある。

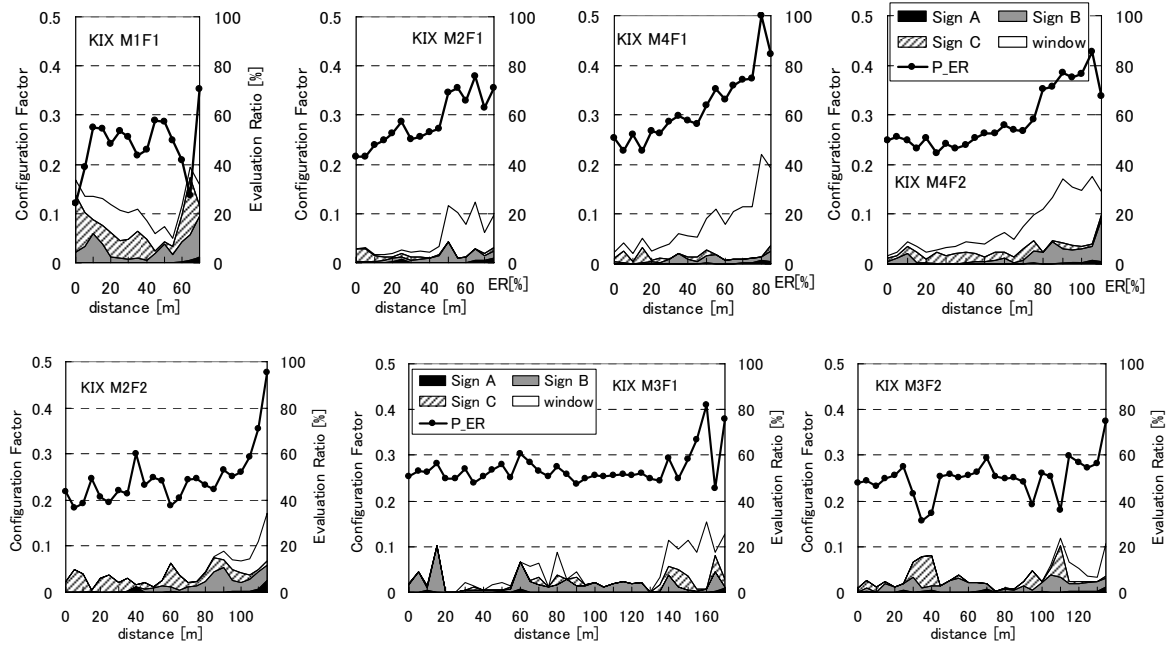


図 3-11 避難経路の各種サイン立体角投射率と経路探索し易さ（KIX、日本）※図 2-11 一部変更

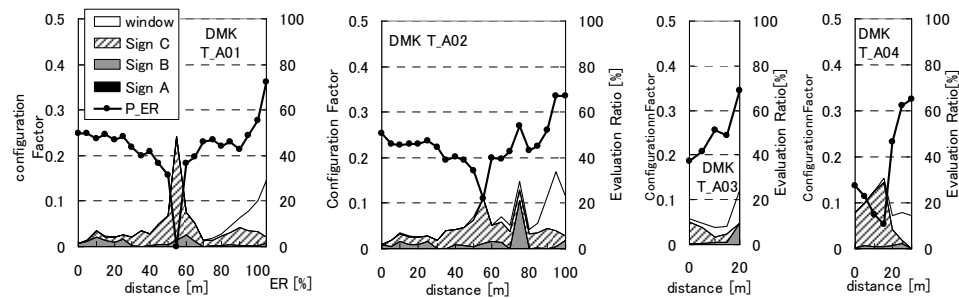


図 3-12 避難経路の各種サイン立体角投射率と経路探索し易さ（DMK, Thailand）※図 2-13 一部変更

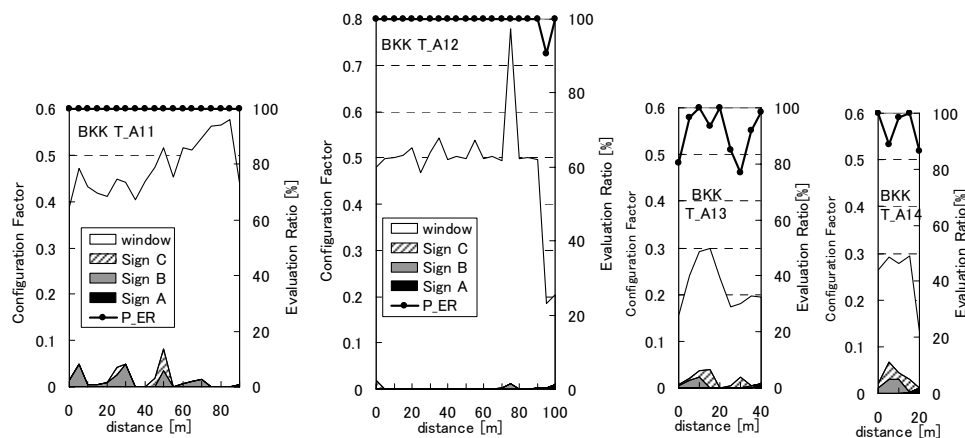


図 3-13 避難経路の各種サイン立体角投射率と経路探索し易さ（BKK、Thailand）

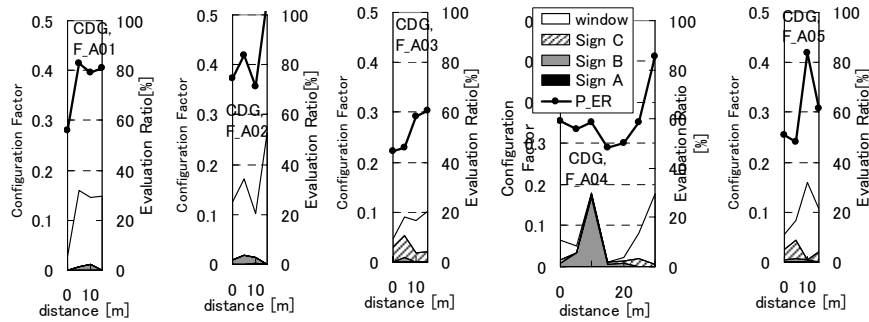


図 3-14 避難経路の各種サイン立体角投射率と経路探索し易さ (CDG、France)

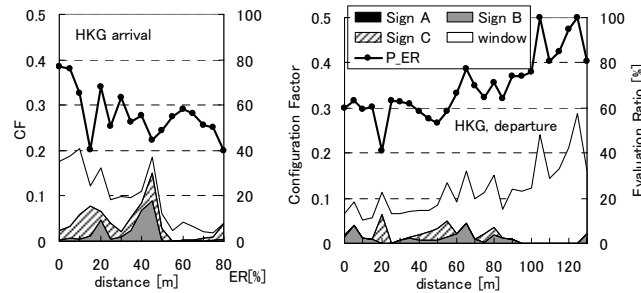


図 3-15 避難経路の各種サイン立体角投射率と経路探索し易さ (HKG、China)

以上、第二章で構築した手法を用いることで、各国の様々な避難経路についてサイン設置状況や経路探索し易さを比較評価することが可能となった。避難経路のサイン計画は、連続的に効果的な出口への誘導が行われていることが必要であり、例えば DMK の T\_A01 (図 3-12) のように、経路途中に広告物が急増し経路探索しにくくなるような状況を避けるべきである。本論文で提案している *ER* 値は、現状のサイン計画のチェックにも利用できる考える。

国際空港ターミナルの避難経路にあるサイン量や *ER* 値の平均値などの統計値について把握することも、サイン計画を評価する上で効果的である。結果を表 3-2 に示す。表中の CF density は各種サイン CF 値の距離密度を表しており、避難経路内に存在している各種サインの CF 値を総和したものを避難経路の距離で除したものである。

避難口誘導灯を扱う  $CF_{\text{sign(A)}}$  はどの国も小さく、距離密度が 0 の避難経路が殆どである。KIX の  $CF_{\text{sign(A)}}$  値総和は高かったが、移動距離も長かったため、距離密度で表すと他国の避難経路と変わらない。図 3-16 に  $CF_{\text{sign(B)}}$  から  $CF_{\text{windows}}$  の距離密度を示す。

案内地図や記名標識を表す  $CF_{\text{sign(B)}}$  が最も距離密度が大きい避難経路は CDG の F\_A02 だが、距離は 15m と短く測定した避難経路とサインの位置が影響していると考えられるため、空間全般に設置が多いのは避難経路が十分長い KIX であるといえる。

広告などを表す  $CF_{\text{sign(C)}}$  は DMK が全体的に多く、KIX の M2F2 も大きい値を示す。

$CF_{\text{sign(A+B+C)}}$  で見ると DMK がやはり全体的に多いが、他の空港も距離密度が大きい避難経路が存在する。しかし BKK や CDG は距離が短い経路であり、サイン総量は DMK、KIX、HKG といったアジア圏の国際空港が多い傾向にある。新空港の BKK はドイツ

表 3-3 国際空港の避難経路におけるサイン立体角投射率と避難経路探索し易さの比較

			CF density per distance						CF sign(C)			ave.	
country	code	route	distance[m]	Sign(A)	Sign(B)	Sign(C)	A+B+C	Window	ave.	max	>0.05	P-ER	
JAPAN	KIX, Osaka Kansai	J_A01	int. departure	85	0	0.002	0.001	0.003	0.014	0.006	0.029	0%	63.2
		J_A02	waiting area	110	0	0.003	0.003	0.006	0.010	0.013	0.023	0%	58.0
		J_A03	int. arrival	70	0	0.006	0.010	0.016	0.008	0.046	0.116	33%	48.0
		J_A04	dom. departure	75	0	0.002	0.001	0.004	0.007	0.007	0.026	0%	57.4
		J_A05	restaurant	115	0.001	0.003	0.004	0.008	0.002	0.021	0.051	4%	49.5
		J_A06	restaurant	170	0	0.004	0.001	0.005	0.004	0.007	0.037	0%	54.1
		J_A07	store	135	0	0.003	0.003	0.006	0.001	0.013	0.069	11%	50.1
Thailand	DMK, Don Muang	T_A01	int. departure	105	0	0.002	0.007	0.009	0.003	0.034	0.227	9%	43.8
		T_A02	int. departure	100	0	0.003	0.007	0.009	0.004	0.032	0.099	10%	45.3
		T_A03	int. arriva	20	0	0.003	0.006	0.009	0.007	0.023	0.048	0%	49.6
		T_A04	int. arrival	30	0	0.001	0.016	0.017	0.006	0.067	0.140	57%	35.7
	BKK, Suvanna bhumi	T_A11	int. departure	90	0	0.003	0.001	0.003	0.097	0.004	0.047	0%	100.0
		T_A12	int. departure	100	0	0	0	0	0.102	0.001	0.019	0%	99.6
		T_A13	int. arrival	40	0	0.001	0.002	0.004	0.046	0.010	0.039	0%	91.4
		T_A14	int. arrival	20	0.001	0.004	0.004	0.009	0.054	0.017	0.037	0%	94.7
France	CDG, Charles de Gaulle	F_A01	int. departure	15	0	0.001	0	0.001	0.031	0	0	0%	74.8
		F_A02	int. arrival 1	30	0	0.007	0.002	0.009	0.010	0.007	0.019	0%	59.5
		F_A03	int. arrival 2	15	0	0.001	0.008	0.008	0.013	0.029	0.044	0%	52.3
		F_A04	int. arrival 3	15	0	0.003	0	0.003	0.041	0	0.002	0%	84.0
		F_A05	int. arrival 4	15	0	0.001	0.005	0.006	0.021	0.020	0.037	0%	61.1
Hong Kong, HKG		H_A01	int. departure	130	0	0.002	0.002	0.004	0.021	0.007	0.064	4%	70.0
		H_A02	int. arrival	80	0	0.004	0.005	0.009	0.012	0.024	0.066	18%	56.0

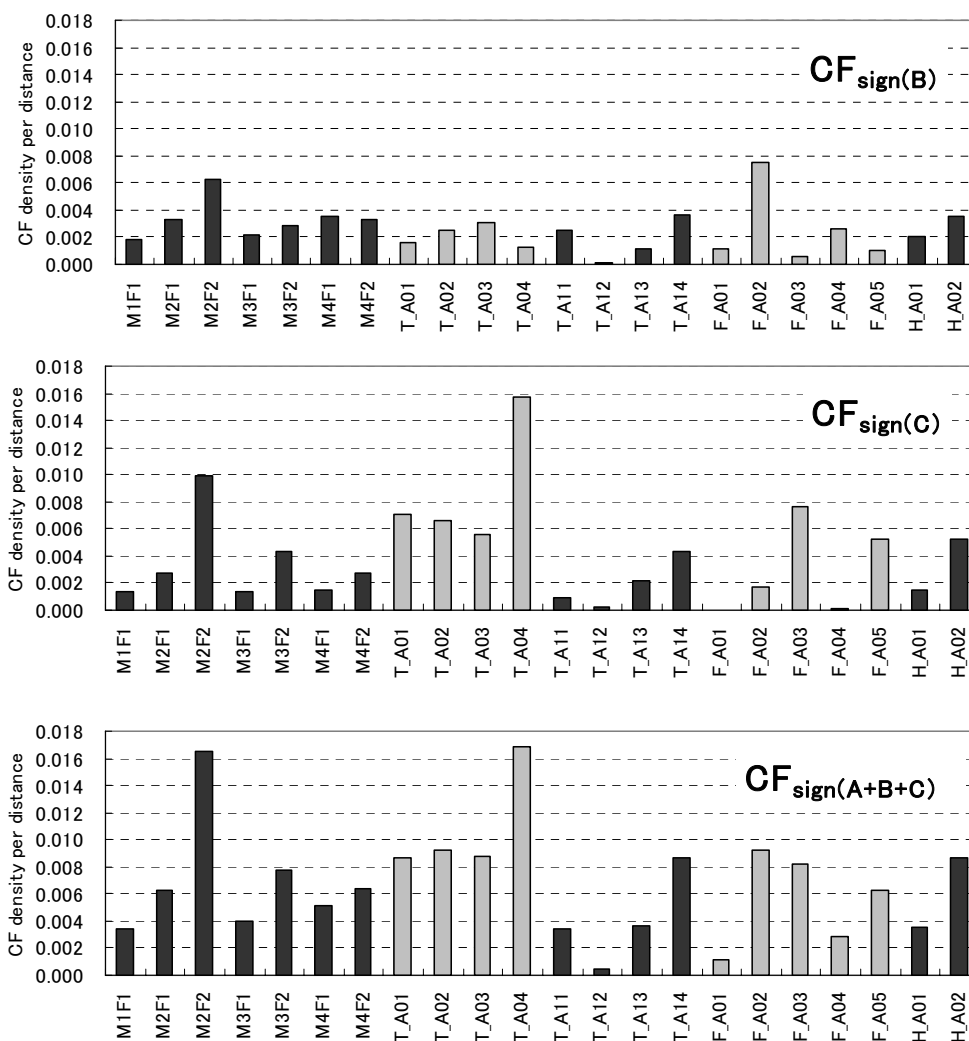


図 3-16 サイン立体角投射率の距離密度(1) CF<sub>sign(B)</sub>、CF<sub>sign(C)</sub>、CF<sub>sign(A+B+C)</sub>

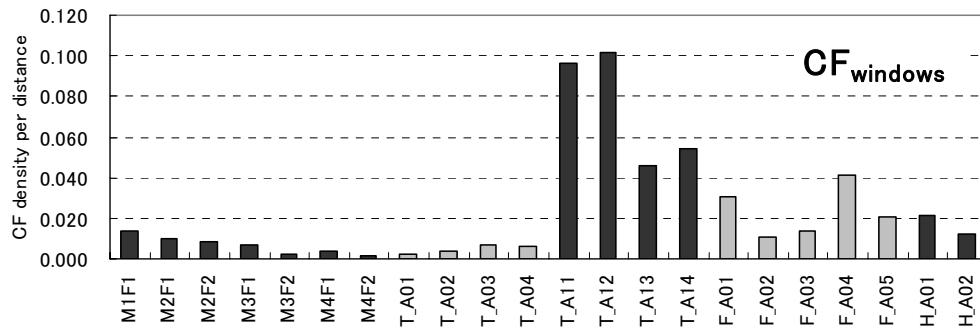


図 3-16 サイン立体角投射率の距離密度 (2)  $CF_{windows}$

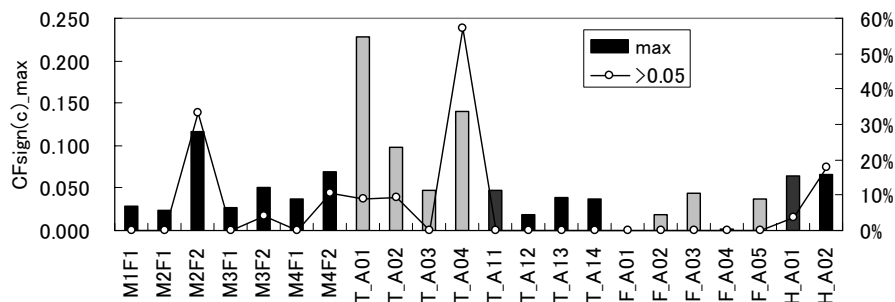


図 3-17 避難経路の広告Sign(C)の寸法： $CF_{sign(C)}$  最大値および $CF_{sign(C)} > 0.05$ の割合

系アメリカ人の建築家ヘルムート・ヤーン的设计であり、サインを極力控え、代わりにガラス窓を多用して開放的な空間としている。CDG も比較的窓が多い。

広告物を含むSign(C)について最大値と $CF_{sign(C)} > 0.05$  の割合の数値を比較し前出表 3-3 及び図 3-17 に示す。図中の棒グラフはSign(C)の最大値を示しており、施設毎の結果を見やすくするために黒と灰を互いに用いて区別している。やはりDMKが共に大きい値を示しており、KIXやHKGといったアジア圏の国際空港もそれに続いている。一方、欧州圏のCDGや欧州建築家によるBKKはSign(C)の最大値が小さく、視野内に $CF_{sign(C)} > 0.05$  となる広告が存在していない。これらが避難経路の平均P-ER値に影響していると考えられ、アジア圏では施設内に設置するサイン量や寸法の制御が必要であると思われる。

### 3-2-3. 地下鉄駅舎のサイン整備

5 カ国で実施した地下鉄駅舎の避難経路における視野画像のサイン立体角投射率と、それに基づく経路探索し易さの結果を図 3-18 から図 3-20 に示す。なお図 3-18 は、第 2 章図 2-12 を一部変更（現地での実際の評価結果 A-ER を削除）したものである。各種サインの立体角投射率 CF の算出方法等および図の表現は前項に準じる。

地下鉄駅舎はその構造上窓が非常に少なく、全くない駅舎も存在する。

日本・京都市役所前駅では、Sign(B)および Sign(C)が多く、殆どの地点で ER が 60% に達していない。特に避難経路 J\_S04 では経路途中に広告物が急増し、経路探索が困難になる状態にあり、早急な対応が必要と考えられる。Thailand・Bangkok の 3 つの地下鉄駅舎、Germany・Nuremberg、Belgium・Antwerp の地下鉄駅舎は、日本に比

べるとサイン設置量が少ないが、広告物が避難経路を通して一定量存在しており、やはり殆どの地点で *ER* が 60%に達していない。地下鉄駅舎としては群を抜いて窓が多い France・Lyon の避難経路 F\_S01 は *ER* 値も大きい、別の経路 F\_S02 は *ER* が 60%程度であり、避難する方向によって経路探索し易さが異なる点は憂慮すべきである。京都の避難経路 J\_S03 と Belgium・Brussels の地下鉄駅舎は避難出口近辺に窓が存在し、そのため *ER* 値もその地点のみ高くなっているが、それ以外の地点では *ER* が 60%に達していない。

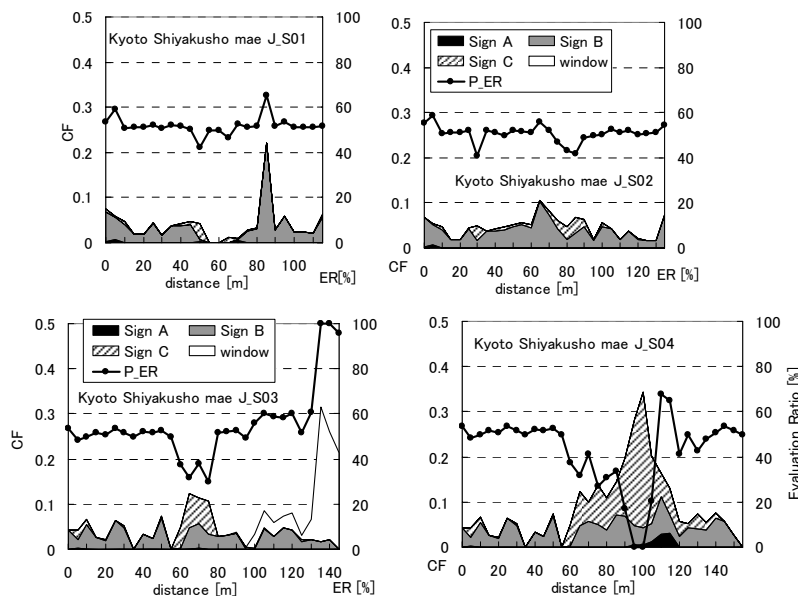


図 3-18 避難経路の各種サイン立体角投射率と経路探索し易さ（京都、日本）※図 2-12 一部変更

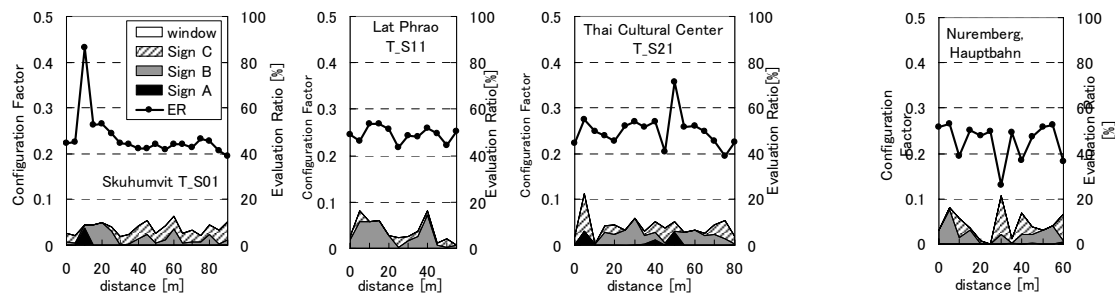


図 3-19 立体角投射率と経路探索し易さ（左 3 図 Bangkok・Thailand、右 Nuremberg・Germany）

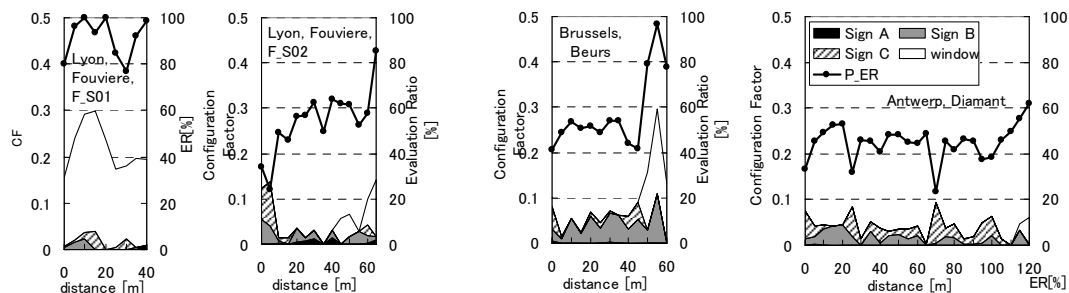


図 3-20 立体角投射率と経路探索し易さ（左 2 図 Lyon・France、右 2 図 Belgium）

以上、前項の国際空港ターミナルと同様に、各国地下鉄駅舎の様々な避難経路についてサイン設置状況や経路探索し易さを比較評価することが可能となった。地下鉄駅舎は閉鎖的な空間であるため、効果的なサイン計画を行わないと避難経路が探索しにくい危険な状態となってしまうことが明らかとなった。

地下鉄駅舎内の避難経路にあるサイン量等の統計値について結果を表 3-4 に示す。

$CF_{\text{sign(A)}}$ は殆どの避難経路で 0 の値となっているが、France・LyonのFouviere駅は中でも大きい。地下空間であるため窓は殆ど存在せず、 $CF_{\text{window}}$ が 0 の値となっている避難経路も多い。

表 3-4 地下鉄駅舎の避難経路におけるサイン立体角投射率と避難経路探索し易さの比較

country,city, station					CF density per distance					CF_sign(C)		ave.
					Sign(A)	Sign(B)	Sign(C)	A+B+C	Window	max	>0.05	
Japan	Kyoto	Kyoto shiyakusho mae	J_S01	115	0	0.007	0.001	0.008	0	0.036	0%	51.8
			J_S02	135	0	0.008	0.001	0.010	0	0.035	0%	50.7
			J_S03	145	0	0.006	0.002	0.008	0.007	0.075	10%	55.3
			J_S04	155	0.001	0.008	0.009	0.018	0	0.300	31%	42.9
Thailand	Bangkok	Skhumvit	T_S01	90	0	0.003	0.004	0.008	0	0.039	0%	47.0
		Lat Phrao	T_S11	55	0	0.006	0.002	0.008	0	0.025	0%	49.2
		Thai Cultural Center	T_S21	80	0.001	0.004	0.004	0.009	0	0.082	6%	50.0
France, Lyon, Fouviere			F_S01	40	0.002	0.004	0.005	0.011	0.001	0.039	0%	53.4
			F_S02	65	0.001	0.004	0.003	0.008	0.004	0.098	14%	54.4
Belgium	Brussels, Beurs		B_S01	60	0	0.009	0.002	0.012	0.007	0.050	8%	57.1
	Antwerp, Diamant		B_S02	120	0	0.003	0.005	0.008	0.001	0.091	12%	45.0
Germany, Nuremberg, Hauptbahn			G_S01	40	0	0.007	0.007	0.014	0	0.086	15%	45.6

図 3-21 に $CF_{\text{sign(B)}}$ から $CF_{\text{sign(A+B+C)}}$ の距離密度を、また避難経路の $CF_{\text{sign(C)}}$ の寸法について図 3-22 に示す。図 3-22 の棒グラフはSign(C)の最大値を示しており、施設毎の結果を見やすくするために黒と灰を互いに用いて区別している。

$CF_{\text{sign(B)}}$ の距離密度はBelgium・BrusselsのBeurs駅が最も大きく、京都市役所前駅は次いでどの避難経路も全体的に大きい。また前出図 3-16 の国際空港の結果と比較すると各国の駅舎ともにサイン量が多い。 $CF_{\text{sign(C)}}$ は京都市役所前駅のJ\_S04 が最も多いが、国際空港の結果と比較すると全体的に広告量は少ない傾向が見られる。 $CF_{\text{sign(A+B+C)}}$ でみても、J\_S04 は抜きん出て大きい値である。この避難経路J\_S04 では、視野の 3 割を占める $CF_{\text{sign(C)}}$ が存在しており、結果的に最低のER値となっており、サイン整備の見直しが必要であると思われる。 $CF_{\text{sign(C)}} > 0.05$ となる割合は、France、Belgium、Germanyの地下鉄駅舎でも 1 割以上を示しており、国際空港と比べて駅舎内には大きい広告が存在していることがわかる。また国際空港の結果で見られたアジア圏と欧州圏の違いは特に見られず、いずれの地下鉄駅舎もER値は十分ではない。地下鉄駅舎空間における広告物規制を中心とした避難経路のサイン整備の見直しが必要である。

以上、第 2 章で構築した手法を用いることで、避難経路のサイン計画の良否を評価することが可能であることを示した。多くの避難経路は広告物を含むサイン量が多すぎるために経路探索が困難な状況であり、近い将来、美観や安全・避難し易さの観点から、公共交通施設を始めとする建築空間内における広告物規制が必要になると思われる。



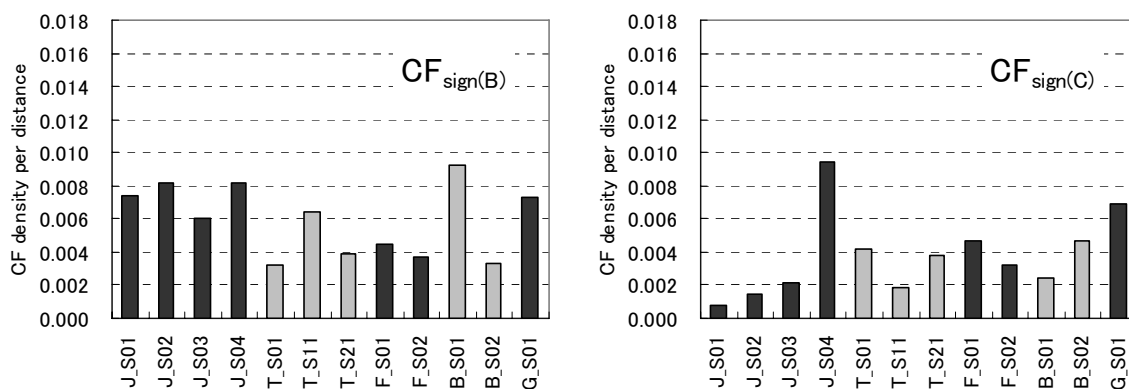


図 3-21 サイン立体角投射率の距離密度 (1)  $CF_{\text{sign}(B)}$  (左) および  $CF_{\text{sign}(C)}$  (右)

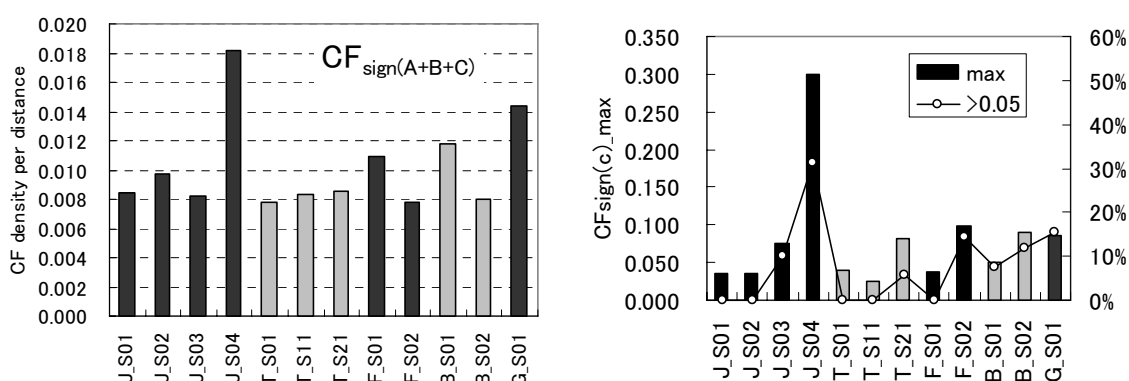


図 3-21 サイン立体角投射率の距離密度 (3)  $CF_{\text{sign}(A+B+C)}$

図 3-22 避難経路の広告Sign(C)の寸法

### 3-3. 都市空間に配備された広域避難場所への避難誘導標識<sup>6)</sup>

#### 3-3-1. 都市空間における避難誘導標識の必要性

現代都市は建築物の高層化や密集化が進み、不特定多数の人間が行き交い、地域コミュニティが弱体化の傾向にあり、かつ住民の高齢化も加速的に進んでいるため、災害に対して脆弱化をたどる一方である。このような状況ゆえに、災害事象に遭遇した被災者が自らの判断で安全な場所へ避難することができる機能を都市に備える必要がある。人が避難する過程は次の三段階を踏むと考えられる。最初に現在地の性状を把握し、避難すべきか否かを判断する。避難すべきだと判断すると、次に避難するための安全な場所を探索する。そして非常口等の標識を目標にしながら避難経路を見つけ出し、最終的に安全な場所へ避難する。この過程の中で現在地や避難経路を記した文字情報は、適切に避難を行うにあたり極めて重要である。空間把握に役立つ文字情報は、一般に三種類の標識として都市や建築物内に設置される。すなわち現在地を表示した「記名標識」、避難場所のような目的地へ誘導する「指示標識」、そして目的地と現在地の「配置図」である。これらの標識が災害時に有効に機能するためには、標識の視認性を確保しておく必要があるが、それは単に標識を視認性の高いデザインにするだけでなく、設置する環境の変化も考慮する必要がある。

災害時の空間把握に有効な標識の内、建築物に設置される非常口や避難誘導灯は、消防法<sup>7)</sup>に基づいて建築物管理者が規定通りの管理を行い、常に高い視認性が確保される状態が維持されている。しかしその他の、特に屋外に設置された標識については、維持管理の形態の違いによって災害時に標識として十分機能できるか否かが異なる。管理者が明確でなく管理方法に規定がない場合、風雨等による劣化によって標識の視認性が低下しても修繕されなかったり、標識が視認しにくい不適切な位置に設置してしまったりする傾向が見られる<sup>注 1)</sup>。標識を行政が管轄する場合、維持管理の責任が明確であり、定期的に修繕を行うため一定の視認性を確保することが可能になる。また標識を効果的に配置・整備することができ、最終的には観光客等の災害時の帰宅困難者の避難誘導にもこれら標識が有効に機能して、都市の防災力を高めることにもつながる。

本項では、多数の観光客が存在する観光都市である京都市において、行政管轄下にある空間把握に有効な標識の視認性に関する実態調査を行い、都市空間に配備された広域避難場所への避難誘導サインの問題点を抽出し今後の改善案を示す。

### **3-3-2. 京都市が管轄する空間把握に有効な標識**

#### **3-3-2-1. 京都市の概要<sup>8)9)</sup>**

京都市は面積 610.22km<sup>2</sup>で東西北が山に囲まれ南に開いた細長い盆地であり、周囲には花折断層や黄檗断層などの活断層帯が存在している。内陸型地震の想定地震規模が M6.3～M7.7 の京都市には広域避難場所が 66 箇所（427.54ha、2,137,700 人収容）、一時避難場所（避難収容施設）が 379 箇所（123,571 人収容）存在する。

総人口は約 147 万人で、その内、高齢者や幼児、障害者といった災害弱者は 27% を占める。京都市には文化財が多く存在しており、全国に対して国宝の約 20%、重要文化財の 14% を占める。観光客は年間 4000 万人以上訪れ、昼間人口は総人口の約 1.09 倍となる。京都市に滞在する外国人は住民の 3.0%、観光客（宿泊）の 3.9% であり、昼間人口の約 3.1% が外国人である。その 1/3 以上は中国や韓国等のアジア圏出身者が占める。

東山区は面積が 7.46km<sup>2</sup>で、人口が 43,987 人（うち高齢者 11,651 人、外国人登録 1,073 人）であるが、京都市の行政区の中で最も多く文化財・史跡が存在しているため、昼間人口は人口の 1.38 倍に増加する。広域避難場所は南北に 2 カ所、一時避難場所は 25 箇所存在する。

#### **3-3-2-2. 空間把握に有効な標識及びその管轄機関**

都市に設置されている現在地や避難場所などの空間把握に関連する標識は、京都市では以下に示す 3 つの所轄で維持管理されている。それぞれの所轄では標識台帳を用いて管理を行っており、各標識には整理番号が与えられ、地理上の設置位置（若しくは住所）と設置時期、及び標識写真は必要最低限の情報として台帳に記載される。

##### **(1) 消防局管轄の標識**

広域避難場所は災害時の避難拠点となるが、それに関連する 2 種の標識は消防局（防災対策室防災課）で管理している（図 3-23）。広域避難場所の出入口に設置される標

識（本項では Sign1 と称する、以下同様）は市全域で 250 枚存在する。京都市に滞在する外国人の使用言語の構成割合を考慮して、1998 年以降、主要な文字情報は日本語・英語・韓国語・中国語の 4 カ国語で表記するようになった。広域避難場所へ誘導する標識（Sign2）は広域避難場所周辺の主要道路に設置されており、市全域で 158 枚存在する。これは現在も日本語のみの表記である。Sign1・Sign2 はデザインが規格化されており、広域避難場所を示すピクトグラムが付記されている。



左：広域避難場所標識（Sign1）

右：広域避難場所誘導標識（Sign2）

図 3-23 京都市消防局管轄の標識（Sign1, Sign2）

## (2) 産業観光局管轄の標識

観光案内地図や観光名所への誘導に関する標識は 3 種類あり、産業観光局（観光部産業企画課）で管理されている（図 3-24）。一つは観光名所や周辺駅等に設置される標識（Sign3）であり市全域で 187 枚存在し、1999 年以降は前述 Sign1 と同様に主要な文字情報が 4 カ国語表記され、さらに 2002 年以降は図中の広域避難場所をピクトグラムでも表記するようになった。二つ目の標識は、交番や小中学校・観光名所等の地点に番地名と周囲 500m の地図を表記した標識（Sign4）であり、1999 年以降に設置されるようになり、現在市全域で 804 枚存在している。この標識も主要文字は 4 カ国語表記されているが広域避難場所のピクトグラム表記はない。三つ目は観光名所への誘導標識（Sign5）であり、これは 2 カ国語（日本語と英語）で表記され、市全域で 181 枚あるが老朽化に伴い撤去される傾向にある。この Sign5 のみデザインが規格化されていない。



左：観光案内図板（Sign3）

中：現在地表示板（Sign4）

右：観光案内誘導標識（Sign5）

図 3-24 産業観光局管轄の標識（Sign3, Sign4, Sign5）

### (3) 建設局管轄の標識

主要幹線道路に設置される著名標識または道路案内標識の管轄部局は建設局（道路部道路維持課）である（図 3-25）。地点標識は交差点の地名（Sign6-Pl）や通り名（Sign6-St）を表記したもので、道路案内標識（Sign7）は設置位置から主要目的地へ方向や道路番号を示したものであるが、いずれも 1990 年から 2 カ国語表記されるようになっている。これらの標識は社団法人日本道路協会が 1986 年に発行した道路標識設置基準<sup>10)</sup>に基づいて規格化されており、デザインは全国統一されている。なお標識台帳はこれまで各道路事務所で管理されており、数年前に道路部維持課にて集中管理されるようになったが、既に撤去された標識についての台帳での対応が不十分なため、正確な標識数は把握できていない。



左：地点標識\_通り名 (Sign6-St) 中：地点標識\_交差点名 (Sign6-Pl) 右：道路案内標識 (Sign7)

図 3-25 建設局管轄の標識 (Sign6, Sign7)

### (4) 一次避難場所の標識

一時避難場所は小中学校や大きな寺社が設定されているが、京都市ではその管理や活用方法を地域の自主防災組織に一任しているため場所を示す記名標識（Sign8）について特定の所轄で管理しておらず、デザインも統一されていない（図 3-26）。また自主防災組織では一時避難場所への誘導標識を市街地に設置していない。



図 3-26 一次避難場所の標識例 (Sign8)

### 3-3-3. 調査概要

調査対象は京都市東山区の中でも特に観光客が集中的に訪問する五条通～三条通に存在する、行政管轄下の Sign1～Sign7 と、一時避難場所に設置されている Sign8 である。東山区全域には広域避難場所が 2 箇所、一時避難場所が 25 箇所あるが、今回の調査区域内には、広域避難場所として円山公園が指定されており、一時避難場所は 12 箇所存在する。調査区域内に存在する調査対象標識数を表 3-5 に示す。なお参考まで市全域および東山区全域の標識数も付記する。

表 3-5 調査対象となる標識の設置数

管轄局	管轄標識	設置標識数		
		調査区域	東山区	市全域
消防局	Sign1 広域避難場所標識	3	5	158
	Sign2 広域避難場所誘導標識	6	8	250
産業 観光局	Sign3 観光案内図版	26	27	187
	Sign4 現在地表示板	21	40	804
	Sign5 観光案内誘導標識	10	16	181
建設局	Sign6 地点標識 (通り名St, 交差点PI)	64	110	不明
	Sign7 道路案内標識	16	27	不明
他	Sign8 一時避難場所記名標識	12	25	379

※調査区域：東山区の五条通?三条通の間の地区

※市全域の標識数は標識台帳から引用(一部不明有り)

標識の実態調査の項目は標識の視認性に関わる次の三項目を取り扱う<sup>11)</sup>。設置空間の光量は照度計、記載文字の反射率は輝度計と標準白色板を用いて測定した。使用色彩はJIS標準色票マンセル 10 色相環を用いて設置位置の光環境下で視感により色相のみ把握した。

- (a) 標識の設置状況：空間の光量、設置位置
- (b) 標識の特徴：標識寸法、使用色彩（色相）
- (c) 記載文字の特徴：反射率、文字寸法、線幅

調査は 2003 年 12 月 3,10,11,17 日の曇天日の 9:00～13:00 と、2004 年 1 月 19,30 日の日没後完全に太陽光が存在しなくなる 18:30～21:00 に行った。日中調査日の太陽光の変動はKYOTO IDMP Station（東経 135°47'、北緯 35°02'、海拔 90m）の直達日射遮蔽バンド<sup>12)</sup>付拡散日射計（遮蔽バンドの半径 250mm,幅 50mm）で測定した全天空照度<sup>13)</sup>で把握する。結果を図 3-27 に示す。2003 年 12 月 11 日は一時降雨があり（その時測定は中断した）他より変動が大きい、全体的に測定時間中は概ね全天空照度は安定している。なお全天空照度結果は測定時間帯の異なる設置空間の光量を相対的に把握する時に用いる。

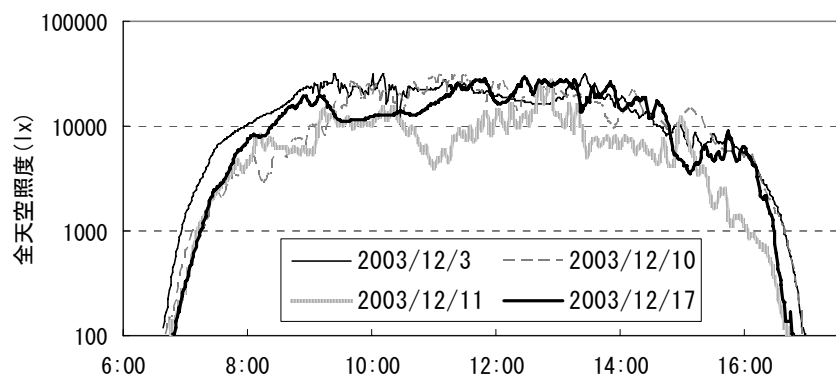


図 3-27 調査日の全天空照度 (KYOTO IDMP Station)

### 3-3-4. 標識の設置状況

#### 3-3-4-1. 設置空間の光量

日中の標識の設置空間の光量を標識直下の地表面照度( $E_g$ )で把握し、同時刻の全天空照度( $E_d$ )と比較した結果を図 3-28 に示す。図 3-28-1 の点線は全天空照度に対する標識地表面照度の割合( $E_g/E_d$ )が 1/10 及び 1/1 となる状態を示す。1/1 の直線よりも上にある結果は地表面照度測定時に拡散光だけでなく直射光も測定したことが考えられ、それは全体の約 36.5%を占める。これらの結果は拡散光成分だけで構成される全天空照度と比較することは不適切なので、これらの結果を除いて設置空間に太陽光がどの程度届いているかどうか  $E_g/E_d$  で把握する(図 3-28-2)。図の縦軸は対象となる結果(99データ)における累積割合であり、図中の矢印は 10%、50%、90%タイル値、横軸側にある太直線とプロットはそれぞれのタイル値での  $E_g/E_d$  を示す。50%タイル値の  $E_g/E_d$  は 0.43 であり、標識の地表面照度が全天空照度の半分以下になる標識は半数以上存在する。地表面照度は建物の密集度や狭い道路幅といった周囲環境に影響されて全天空照度よりも低くなるが、地表面照度が全天空照度の 2 割満たず十分な光量を確保できない標識も 1 割程度存在する。

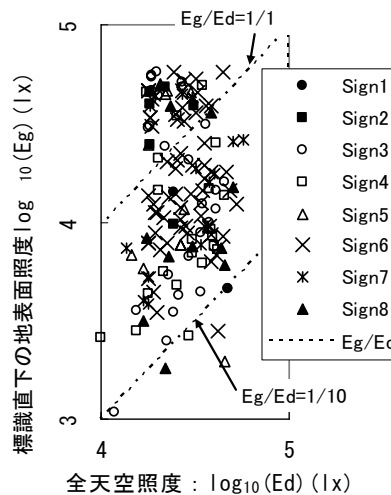


図 3-28-1  $E_d$  と  $E_g$  の関係

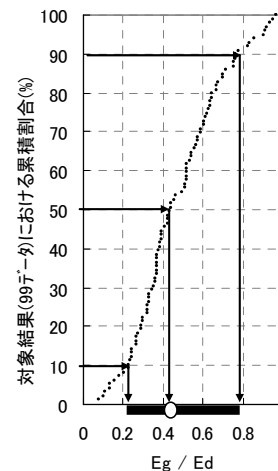


図 3-28-2  $E_g/E_d$

図 3-28 同時刻の全天空照度  $E_d$  と標識直下の地表面照度  $E_g$

図 3-29 に標識面に照射される光量(標識面照度: $E_t$ )の結果を示す。なお測定対象は測定可能な設置高さ 3.0m 以下の標識であり、図 3-28 と同様の結果処理を行って 10%、50%、90%タイル値を算出している。夜間(図 3-29-1)では避難場所に関連する Sign1 と Sign8 の 50%タイル値が低く、地図関連の Sign3 と Sign4 は他より高い。標識面照度が 1.0lx を満たない標識は全体の約 2 割存在しており、十分な視認性を確保できないことを意味している。夜間標識面照度の全平均値は 10lx である。昼間(図 3-29-2)でも Sign1 は他より 50%タイル値が低い。昼間での全標識の平均光量は 17000lx である。



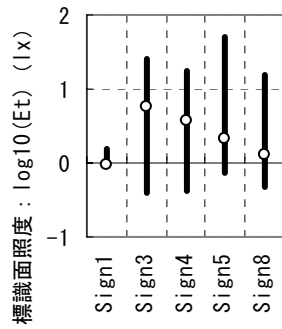


図 3-29-1 夜間の Et

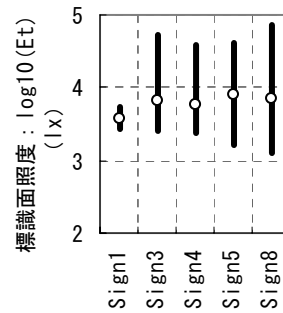


図 3-29-2 昼間の Et

図 3-29 標識毎の標識面照度 Et 分布

### 3-3-4-2. 平面的配置

調査地区における標識の平面配置図を管轄毎に図 3-30 に示す。なお地図は ZENRIN electronic atlas Z Professional 2 を用いて作成した。

消防局が管轄している標識は広域避難場所に直接関連するものである。広域避難場所標識 Sign1 は避難場所の主要入口に設置されている。しかし広域避難場所誘導標識 Sign2 は周辺の主要幹線道路に数カ所設置されているに過ぎず、設置間隔<sup>注2)</sup>は約 310m

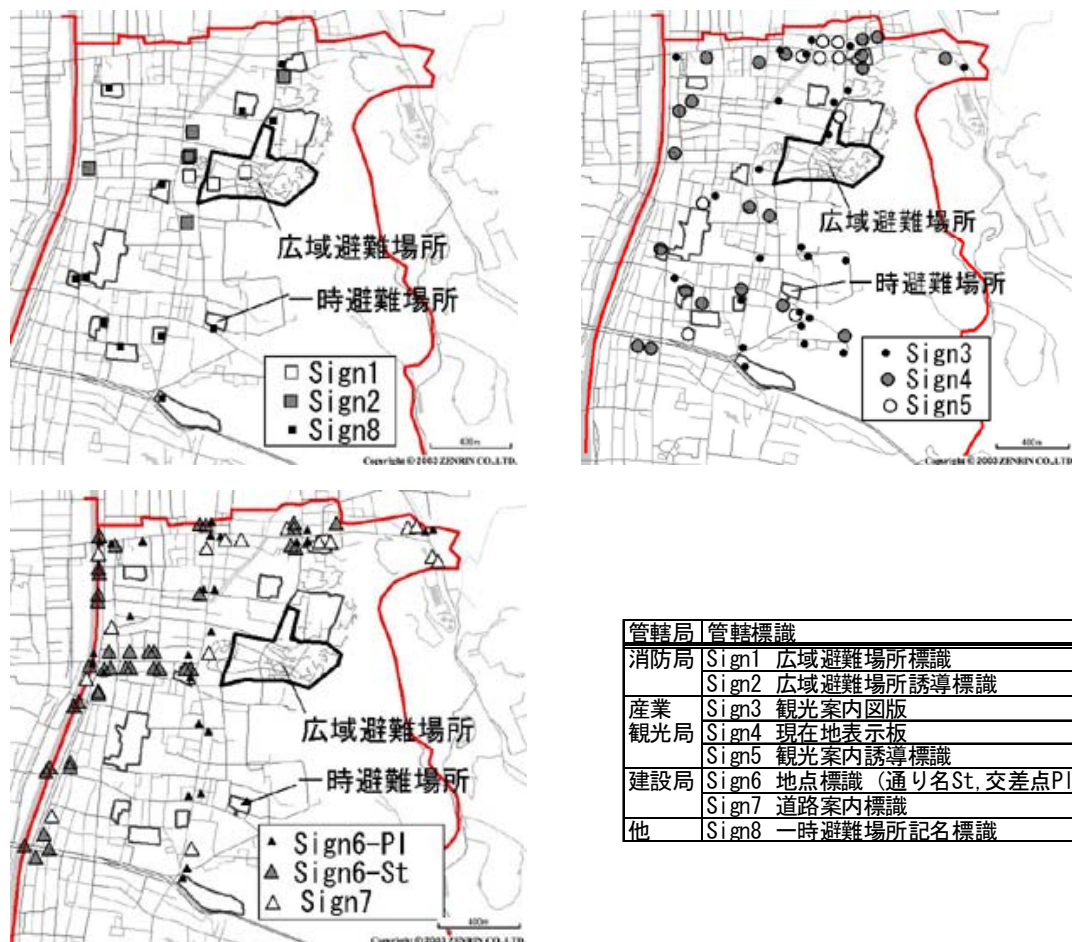


図 3-30 管轄別の標識配置図

である（図 3-30 左上）。なお図には一時避難場所記名標識 Sign8 の設置位置も記載しているが、一時避難場所についての誘導標識は存在しない。

産業観光局が管轄している標識は土地に不慣れな観光客を対象としているので、調査区域にまんべんなく分布しており、設置間隔は約 140m である（図 3-30 右上）。なお観光案内地図 Sign3 は観光地の集中する東山周辺に、周辺地図 Sign4 は市街地内に多く分布する。

建設局は対象地区の四車線以上の幹線道路沿いに標識を多数設置しており、設置間隔は約 190m である（図 3-30 左下）。

### 3-3-4-3. 設置高さ

標識中心部の設置高さを表 3-6 に示す。配置図関連の Sign3 と Sign4 はほぼ眼高に標識中心部があり、観察しやすい位置にある。産業観光局の Sign5 と一時避難場所記名標識 Sign8 も比較的低いが、それ以外の殆どの標識は設置位置が高い。

表 3-6 標識の設置高さ（床面から標識中心までの高さ：m）

	消防局		産業観光局			建設局		他
	Sign1	Sign2	Sign3	Sign4	Sign5	Sign6	Sign7	Sign8
平均値	2.70	3.65	1.54	1.41	2.39	3.96	6.05	2.21
標準偏差	0.59	0.73	0.38	0.27	0.83	1.15	1.26	1.70

### 3-3-5. 標識の特徴

#### 3-3-5-1. 標識の面積

標識の面積を表 3-7 に示す。行政管轄下の標識 Sign1～Sign7 は基本的に規格化されている。Sign1、Sign3、Sign7 以外の殆どの標識は面積が 1.0m<sup>2</sup>未満である。

表 3-7 標識の面積（m<sup>2</sup>）

	消防局		産業観光局			建設局		他
	Sign1	Sign2	Sign3	Sign4	Sign5	Sign6	Sign7	Sign8
平均値	1.47	0.24	1.01	0.24	0.56	0.71	7.70	0.77
標準偏差	0.20	0.00	0.25	0.00	0.58	0.18	3.60	0.95

#### 3-3-5-2. 使用色彩

標識に全く色彩がない標識は全体の 3.8%しか存在せず、その殆ど（5 標識/6 標識）は Sign8 である。

部局毎の全ての標識の記載文字における、文字と背景の使用色相の組合せについて表 3-8 に示す。数値は部局毎の標識に記載されている全文字数に対する割合を示す。消防局の標識は文字も背景も無彩色の組合せが全体の 7 割以上を占める。建設局の標識は背景 PB と文字 N の組合せが規格で定められており 96%を占める。産業環境局の標識は最も多彩で RP 以外の全色相が背景に使用されている。色彩は記載内容の区別や誘目性等の長所があるため多用される傾向があるが、輝度対比を十分配慮しない色彩の使用は視認性を低下させるので注意が必要である。



表 3-8 標識の記載文字に使用される色相の割合 (%)

管轄局 (京都市)	文字 色相	背景色相									
		R	YR	Y	GY	G	BG	B	PB	P	N
消防局 文字数1688	G										0.7
	PB										2.1
	N	13.6	3.7	3.7		3.6		0.7			71.9
産業 観光局 文字数67723	R			0.0				0.0			0.2
	Y										
	G					0.0					0.0
	B										0.2
	PB			0.0							0.1
	P										0.0
	N	3.1	30.3	17.3	0.3	15.4	0.0	9.3	0.0	0.5	23.1
建設局 文字数1780	R										0.4
	Y								0.4		
	PB										57.5
	N					1.0			38.5		2.1
他 文字数103	Y										37.9
	G					8.7					
	N			8.7							44.7

### 3-3-6. 標識の記載文字の視認性

#### 3-3-6-1. 視認性モデル<sup>11)14)15)</sup>

標識の視認性、すなわち記載文字の読み易さの程度を決定する要因は、標識の設置環境・記載文字の性状および観察者の視認能力である。そのうち前者二要因は相互に関連し合う場合が多く、最終的に視認性に深く関与する物理量として背景輝度 ( $L_b$ : 単位  $\text{cd/m}^2$ )・文字と背景の輝度対比 ( $C$ )・記載文字の寸法 ( $S$ : 分) に集約される。観察者の視認能力は視力 ( $VA$ ) で取り扱う。標識の記載文字を読む場合 (観察時間 0.1 秒以上<sup>16)</sup>)、読み易さの程度 ( $\alpha'$ : 同じ視認能力を持つ集団で「普通に読める」以上の視認性評価を回答する割合) は、これら 4 つの変数の関数として式 3-1 で表されることが実験的に得られている<sup>11)14)15)</sup>。

$$S = \frac{30 \times 10^{0.75\alpha'}}{VA \times L_b^{0.23} \times C} \quad \text{式 3-1}$$

成立範囲  $10 \leq S \leq 100$ ,  $0.35 < L_b < 1400$ ,  $0.52 \leq C \leq 0.93$ ,  $VA \geq 0.1$ ,  $0.05 \leq \alpha' \leq 0.95$

#### 3-3-6-2. 視認性に関する危険度の設定

災害時における標識の視認性について検討するにあたり、要求される読み易さの程度・被災者の視認能力および標識に照射する光量を考慮する必要がある (表 3-9)。本報告では十分な視認性を確保する  $\alpha' = 0.8$  を災害時に要求される読み易さの程度と定義する。視認能力 (視力) は青年と高齢者では大きく異なり<sup>17)</sup>、眼高も異なる<sup>18)</sup>。標識に照射する光量は昼間、夜間、無灯時 (月光のみ) を取り扱う。昼間と夜間の光量は、周囲の建物や照明器具の配置など設置環境の状況を考慮して、標識面照度の実測調査の平均値を代表値に用いる。

表 3-9 標識の視認性に関する危険度の設定

要求される読み易さの程度	$\alpha' = 0.8$
視認能力（眼高）	青年2.0(1.58cm)、高齢者1.0(1.49cm)
照射する光量	昼間17000lx、夜間10lx、無灯時0.2lx

### 3-3-6-3. 視認距離<sup>1)</sup>

物理量の異なる各管轄部局の標識の視認性を比較検討するため、等しい視認性を得るための視認距離  $D$ [m]を算出する。視認距離算出に必要な物理特性値を図 3-31 に、視認距離の算出式を式 3-2 から式 3-4 に示す。 $\delta$ は標識中心部を観察者が見る時の角度(度)、 $S'$  は標識の実寸法である。なお要求される視認性を確保できない場合は、視認距離は算出できないため、本項では  $D=0$  で取り扱う。

$$D = \sqrt{V^2 - (H - h)^2} \quad \text{式 3-2}$$

$$V = \frac{\cos \delta \times (S' / 2)}{\tan \{S / (2 \times 60)\}} \quad \text{式 3-3}$$

$$\cos \delta = D / V \quad \text{式 3-4}$$

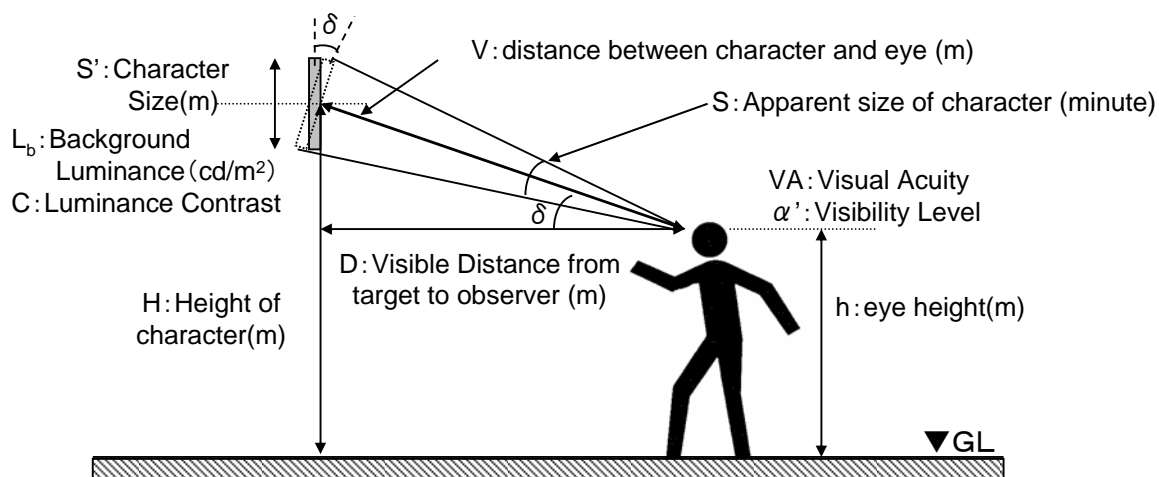


図 3-31 視認距離  $D$  の算出に必要な物理特性値

### 3-3-6-4. 標識の記載文字の視認性

表 3-8 の危険度毎に記載文字の視認距離を算出して標識の視認性を判定する。まず標識全体の視認性について、一文字あたりの平均視認距離 ( $D_{ave}$ ) を式 3-5 で求める。 $n$  は一標識に存在する文字数であり、 $D_n$  は個々の文字の視認距離を示す。

$$D_{ave} = \frac{\sum D_n}{n} \quad \text{式 3-5}$$

管理部局毎の  $D_{ave}$  の 10%、50%、90%タイル値を図 3-14 に示す。データのない標識は視認性が低く  $D_{ave}$  が算出できないことを意味する。道路に設置される Sign2、Sign6、Sign7 では、昼間の  $D_{ave}$  は高齢者も 10m 以上で十分な視認性が確保されている。一方、

配置図であるSign3の視認性は低く、昼間でも殆どの $D_{ave}$ が1.0m満たない。

青年より高齢者、昼間より夜間の方が、 $D_{ave}$ が短い。夜間では高齢者は広域避難場所関連のSign1 およびSign2 の $D_{ave}$ が算出できなくなり、青年も $D_{ave}$ が1.0m満たない標識が多くなる。無灯時には殆どの標識の $D_{ave}$ が1.0m未満となる。

標識の種類はまず主要文字を読むことによって判断される。この主要文字には日本語以外の言語も表記される標識があるが、外国語の文字寸法はいずれも日本語より小さい。そこで主要文字の視認距離 $D_{main}$ を日本語と英語について算出し図3-33に示す。日本語に比べて寸法が半分程度の英語の視認距離はどの標識も短い。また無灯時には英語文字のいずれも $D_{main} < 1.0$ となる。広域避難場所を示すSign1の英語主要文字は夜間の結果が青年でも算出不能になっており、視認性上の問題がある。

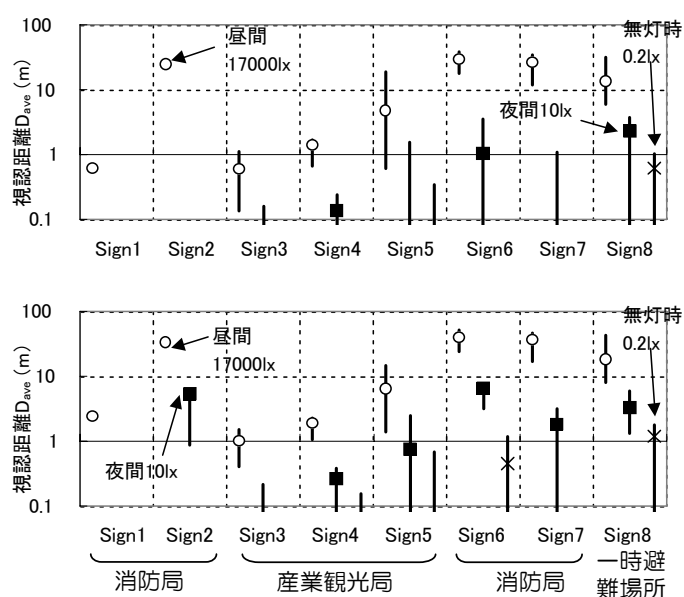


図 3-32 一文字あたりの平均視認距離 $D_{ave}$  (上：高齢者、下：青年)

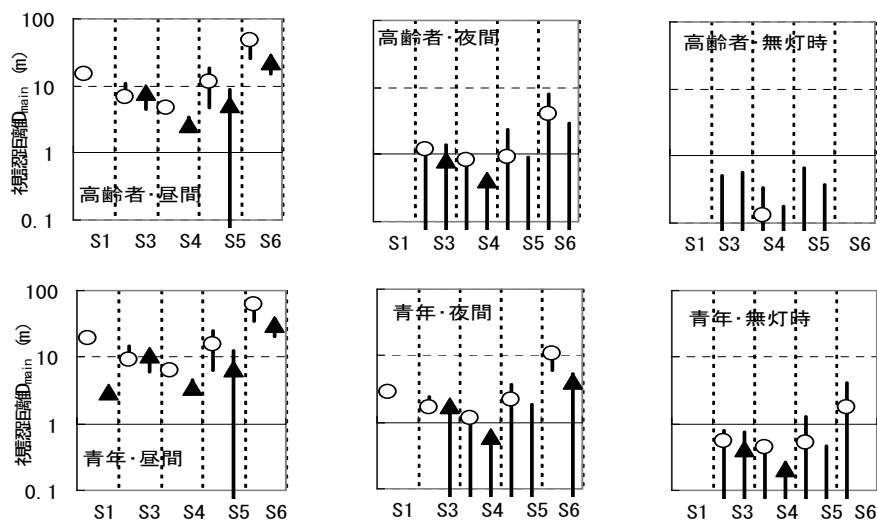


図 3-33 主要文字の視認距離 $D_{main}$  ○日本語▲英語S=Sign (上：高齢者、下：青年)

標識の平均視認距離 $D_{ave}$ と日本語主要文字の視認距離 $D_{main}$ 、主要文字に次いで重要な語の現在地（Sign1, Sign3, Sign4, Sign5 に存在）、広域避難場所のピクトグラム（Sign1,2,3）の視認距離を算出し図 3-34 に示す。図より $D_{main}$ が十分長くても、標識全体の視認性を示す $D_{ave}$ は短い標識が存在する（Sign1, Sign3）。現在地の視認距離は $D_{main}$ に比べて遙かに短く位置を把握しにくい。特にSign1 では視認性が低く視認距離を算出できない。一方ピクトグラムは $D_{ave}$ が短いSign1, Sign 3において視認距離が長く効果的に機能している。ただし京都市が利用する広域避難場所のピクトグラムは周知されているものではなく、広報による周知徹底が必要である。

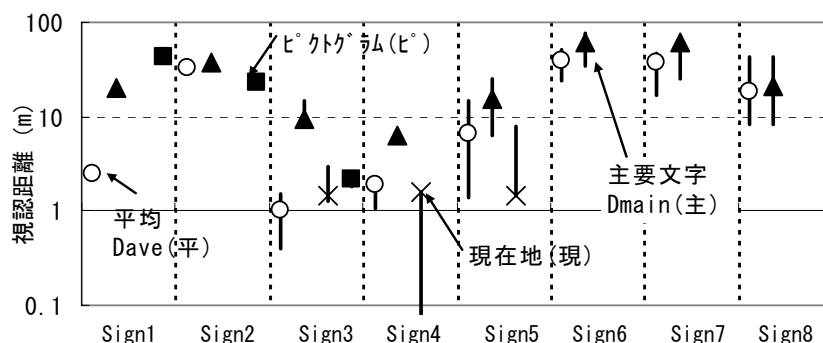


図 3-34  $D_{ave}$ ・ $D_{main}$ ・現在地・ピクトグラムの視認距離の比較（昼間・青年）

### 3-3-7. 現状の問題点と対策

京都市東山区の調査対象地区に設置されている標識に関する実態調査を行い、次の3点の問題点を抽出した。

- (1) 避難場所（広域および一時）を誘導する標識の配置が不十分である。視認距離の長い Sign2 は限られた地点のみに設置されており、地区全体に分布している Sign3 の視認性は低い。
- (2) 夜間および無灯時の標識の視認性が不十分である。高齢者は広域避難場所関連の標識を視認できず、その他の標識の視認距離も短い。
- (3) 現在地を示す文字の視認性が不十分である。現在地の視認距離は主要文字に比べて遙かに短く、地図上の現在位置を把握しにくい。

これらの問題点を解決するための対策案として、以下の3点が考えられる。

- (1) 風化による影響を最も受けにくい文字寸法を重点的に取り上げ、標識のデザインを見直す。特に主要文字や現在地を示す文字寸法を、できる限り大きくする<sup>注3)</sup>。
- (2) 広域避難場所を示すピクトグラムを積極的に利用する。但し十分な寸法が必要である。またピクトグラムが抽象的なデザインの場合は、それが何を示しているのか伝わらないことが多いので、使用デザインについても配慮する。
- (3) 主要道路に密に設置され視認性の高い道路標識に広域避難場所の位置情報を併記するなどの、部局間を越えた標識管理や配置計画を実施する。

道路標識のような都市基盤整備に関する標識は全国各地の都市に多数配置されており、また京都市のような観光都市では市街地案内図を含む観光関連の標識が観光客の集中する場所に多数配置される傾向がある。災害時の避難場所に関する情報を視認性の高い状態でこれらの標識に掲載することで、土地勘のない観光客にも適切に避難誘導を行うことができるため、本項で得られた知見は他の観光都市にも積極的に導入すべきである。なお災害時や復興時などにおいても文字情報は災害情報の有効な伝達手段として活用できるので、仮設の標識であっても視認性には十分考慮する必要がある。

### 3-4. まとめ

本章第二項では、実態調査結果に基づいて公共交通施設内部の避難経路におけるサイン整備の現状と課題について検討した。前章で構築した手法を用いることで、各国の様々な避難経路についてサイン設置状況や経路探索し易さを比較評価することが可能となり、現状のサイン整備の良否チェックに利用できることを示した。さらに、国際空港ターミナルではアジア圏において広告物を含むサイン設置量が多く経路探索に対して負荷となっているため、これらサイン量に対する制御が必要なことを示した。また閉鎖的空間である地下鉄駅舎では、いずれの国でも経路探索しにくいものとなっており、サイン整備の見直しが必要なことを示した。多くの避難経路は広告物を含むサイン量が多すぎるために経路探索が困難な状況であり、近い将来、美観や安全・避難し易さの観点から、公共交通施設を始めとする建築空間内における広告物規制が必要である。

本章第三項では、屋外の都市空間内に存在する、広域避難場所への避難誘導サインの現状と課題について、京都市東山区を対象とした実態調査に基づき検討した。結果、避難場所（広域および一時）を誘導する標識の配置が不十分で、夜間および無灯時には十分な視認性を確保できないデザインとなっているため、広域停電などが考えられる大規模災害時に対して改善の余地があることを示した。また現在は3部局において別々に管理している広域避難場所への誘導サイン整備について、部局間を超えた標識管理や配置計画が必要であることを示した。

本章では、屋内外にある現実の避難経路にあるサインの整備について評価を行い、今後の課題を示した。これらの具体的な事例は、建築都市空間において円滑に避難誘導を行うためのサイン計画の参考資料と成りうる。しかし第二章で構築した立体角投射率に基づく評価方法は、現実の空間に対して適切なサイン整備状態かどうか評価を行うことはできるが、新しい空間に対する避難誘導サインの最適設計方法を提案するまでには至っていない。またサイン設置状況の悪化に伴う経路探索時間の加算といった、避難経路の視環境状態による避難完了時間への影響を避難安全検証法へ組み込むためには、視野内のサイン立体角投射率と経路探索時間の関係の把握等、今後も検討すべき課題が残されている。

注：

- 注 1) 岐阜県高山市では、広域避難場所への誘導標識を、その設置を許可する一般住宅に配布しており、その管理や設置位置は各住宅所有者に一任している。筆者らはその誘導標識に関する実態調査を行ったが（調査サンプルは 14 標識）、8 年以上メンテナンスを行わなかった標識の 8/14 は風雨等の劣化によって輝度対比が 0.5 未満に減少していた（本来の輝度対比は 0.8 以上ある）。また 10/14 の標識が草木の蔭や周囲と同化してしまう位置など不適切な位置に設置されていた。
- 注 2) 標識の設置間隔は隣接する 2 標識の最短距離を平均した値を用いる。
- 注 3) 例えば背景反射率 0.79・輝度対比 0.67・設置高さ 190cm（何れも全ての標識における各物理量の平均値）の標識記載文字を高齢者が 10m 以上離れた位置から容易に視認するために必要な文字寸法は、昼間 8cm、夜間 43cm、無灯時 104cm である。

参考文献：

- 1) Yuki AKIZUKI, Shino OKUDA, Michico IWATA and Takeyoshi TANAKA、Study on Quantifying Signs and Advertisements of Passageway in Public Buildings: International Comparison of Airports and Subway Stations、Proceedings of Interim Meeting of the International Colour Association、pp.150-153、2008.6
- 2) Yuki AKIZUKI, Shino OKUDA, Michico IWATA and Takeyoshi TANAKA、Evaluation Method for Easy Wayfinding of Escape Routes by Configuration Factor, Study on Visual Environment Designs for Smooth Evacuation Guidance No.2、日本建築学会環境系論文集、Vol.77、No.674、頁未定、2012 年 4 月（掲載決定）
- 3) Bangkok Suvarnabhumi Airport Map [http://www.suvarnabhumiairport.com/king\\_power\\_shop\\_en.php](http://www.suvarnabhumiairport.com/king_power_shop_en.php) (accessed 2011-11-28)
- 4) Paris Airports-Charles de Gaulle Terminal 2F [http://www.bonjourlafrance.com/air-france/paris\\_charles\\_de\\_gaulle\\_airport/cdg-terminal-2f.htm](http://www.bonjourlafrance.com/air-france/paris_charles_de_gaulle_airport/cdg-terminal-2f.htm) (accessed 2011-12-8)
- 5) Hong Kong International Airport <http://www.hongkongairport.com/eng/interactive-map.html> (accessed 2011-12-8)
- 6) 秋月有紀・田中哮義・岩田三千子、災害時の避難誘導に関する行政管轄下の標識の視認性－京都市東山区を対象とした実態調査－、都市計画論文集、No.39-3、pp.589-594、2004.10
- 7) 消防法規研究会編：平成 15 年新版消防基本六法、p.288、東京法令出版、2003
- 8) 京都市：京都市統計書 平成 14 年版、2002
- 9) 京都市：京都地域防災計画書、2002
- 10) 社団法人日本道路協会：道路標識設置基準・同解説、丸善株式会社、1987

- 11) 社団法人日本建築学会環境工学委員会光環境小委員会色彩と明視性 SWG：公開研究会 生活の中の色-サイン等の標示物の色彩計画-資料、pp.(II)1-13、2002
- 12) 社団法人日本建築学会：建築環境工学実験用教材 I 環境測定演習編、pp.2-13、丸善株式会社、1992
- 13) 浦野良美・中村洋：建築環境工学、pp.134-139、森北出版株式会社、1996
- 14) 秋月有紀・井上容子：明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討、日本建築学会計画系論文報告集、No.562、pp.1-7、2002
- 15) Inoue Y., Akizuki, Y. : The optimal illuminance for reading, Effects of age and visual acuity on legibility and brightness, Journal of Light and visual Environment, Vol.22, No.1, pp.23-33、1998
- 16) Roufs J.A. : Dynamic parties of vision-I. Experimental relationships between flicker and flash thresholds, Vision Research Vol.12, p.261、1972
- 17) Akizuki, Y., Inoue Y. : The concept of visual acuity ratio to the maximum level of individual visual acuity. The evaluation method of background luminance and visual distance on visibility taking into account of individual visual acuity, Journal of Light and visual Environment, Vol.28, No.1, pp.35-48、2004
- 18) Japanese Body Size Data 1992-1994 : Research Institute of Human Engineering for Quality life、2003





## 第二部 建築火災に対応した避難経路の視環境設計

### 第4章 避難経路の視環境条件と避難者視力に基づく歩行速度の計算モデル

#### 4-1. はじめに

火災時の避難経路は停電や煙の伝搬により視認性が大きく低下し、それに伴い避難者の歩行速度に影響する。非常灯の非常点灯時は直下床面照度 1[lx]以上確保することが定められている<sup>1)2)</sup>が、これは歩行空間の床面照度と歩行速度に関する既往研究<sup>2)</sup>に基づいている。しかし一方、被験者の属性（年齢）が変われば同じ照明下であっても歩行速度が変わる知見もある<sup>3)</sup>。視認性は照明や視対象の状態及び人間の視認能力によって決定されるため、避難経路の歩行速度を予測するためにはこれらを網羅する必要がある。

そこで本章では実大歩行空間を用いて、火災煙を含む様々な光環境下で視認能力の異なる被験者の歩行速度を測定し、視認性に応じた歩行速度の予測式を構築する<sup>4)</sup>。なお避難経路の照明状態が悪くなり視認性が低下すると、足下の安全確保を優先するため視線は床面に向かう。また停電時に作動する非常灯照明の規定値は床面照度で設定されている<sup>1)2)</sup>ので、本研究での歩行速度計算モデルの指標として床面照度を設定した。

#### 4-2. 実験

##### 4-2-1. 実験空間

図 4-1 に実験空間の概要を示す。大きさは高さ 1.77[m]×幅 1.77[m]×幅 27.78[m]である。実験空間の天井高さに限界があったため、できるだけ身長 1.77[m]以下の被験者を選択した。6 人の被験者は 1.77[m]より身長が高く、実験中は少し屈みながら歩行したが、歩行速度や主観評価の結果には他の被験者と比較して特に大きな違いは見られなかった。実験空間は順応室（長さ 5.58[m]）・歩行空間（18.48[m]）・評価室（3.72[m]）の 3 室からなり、それぞれの空間は黒色遮光カーテンで遮られている。内装反射率は天井・壁・床すべて 0.427 で、歩行空間と評価室には遮光カーテンの手前に壁面とほぼ同色のカーテンを配置した。

順応室と歩行空間には、20[W]の直管型蛍光灯照明器具を天井隅角部に 3.6[m]の間隔で設置していて、それらは個別に調光可能である。また歩行空間の室中央（歩行位置）の照度分布はほぼ一様である。

歩行空間には、3[m]の間隔赤外線センサを設置し、被験者の通過時間を自動計測した。実験空間は直線の単純な通路であり、予備実験では照明の変化が歩行速度に顕著に影響しなかったため、被験者に視認性のタスクを負荷する目的で、反射率 0.36 の大小立方体（一辺 5[cm]と 10[cm]）を歩行空間床面におおよそ 1.5[m]間隔にランダム配置した。立方体と床面との輝度対比は 0.16 である。被験者は実験中に立方体を避けて歩行するよう教示されるため、注意して歩行空間の床面を観察するようになり、歩行

速度に対して床面照度レベルが反映することとなった。

実験時の煙として、人体に無害な白煙を発生させる煙発生装置 Fog Machine (Rosco 1700)を用い、歩行空間中央にファンと共に配置して空間全体に煙が拡散されるようにした。煙の光学的濃度は光電管装置を用いて測定し、高さ 0.9[m]で壁面から 0.1[m]離れた位置で、歩行空間の入口から 1.5[m]、6.5[m]、11.5[m]、16.5[m]の 4 箇所に設置した。光学的濃度  $C_s$  は光電管の電圧（初期値  $V_o$  と煙のある時の  $V$ ）と二極間距離  $d$ [m]を用いて、式 4-1 により換算する。5 秒間隔に得られる  $C_s$  を、同一日時の実験被験者グループにおいて最初の被験者の歩行開始時刻から最後の被験者の終了時刻までの実験実施時間帯の中 4 分間について平均し、4 箇所での光電管の値をさらに平均したものを実験時の光学的濃度として採用した。

$$C_s = \frac{1}{d} \times \log_e \frac{V}{V_o} \quad \text{式 4-1}$$

煙発生装置を用いて煙の光学的濃度一定値に制御するのは困難であり、4 箇所での測定値には約 0.3[1/m]の違いがあり、また実験日時により 0.2~1.8[1/m]の変動が見られたが、全ての結果の平均値 0.68[1/m]を代表とする。

実験空間には白煙以外に実際の火災を体感できるような工夫は特に行っていないため、被験者の心理状態は火災時の緊迫した状況と異なるので、結果の利用には注意を要するが、照明環境条件の視認能力と歩行速度の関係といった基礎的知見として有益な結果を提供する実験空間であると考える。

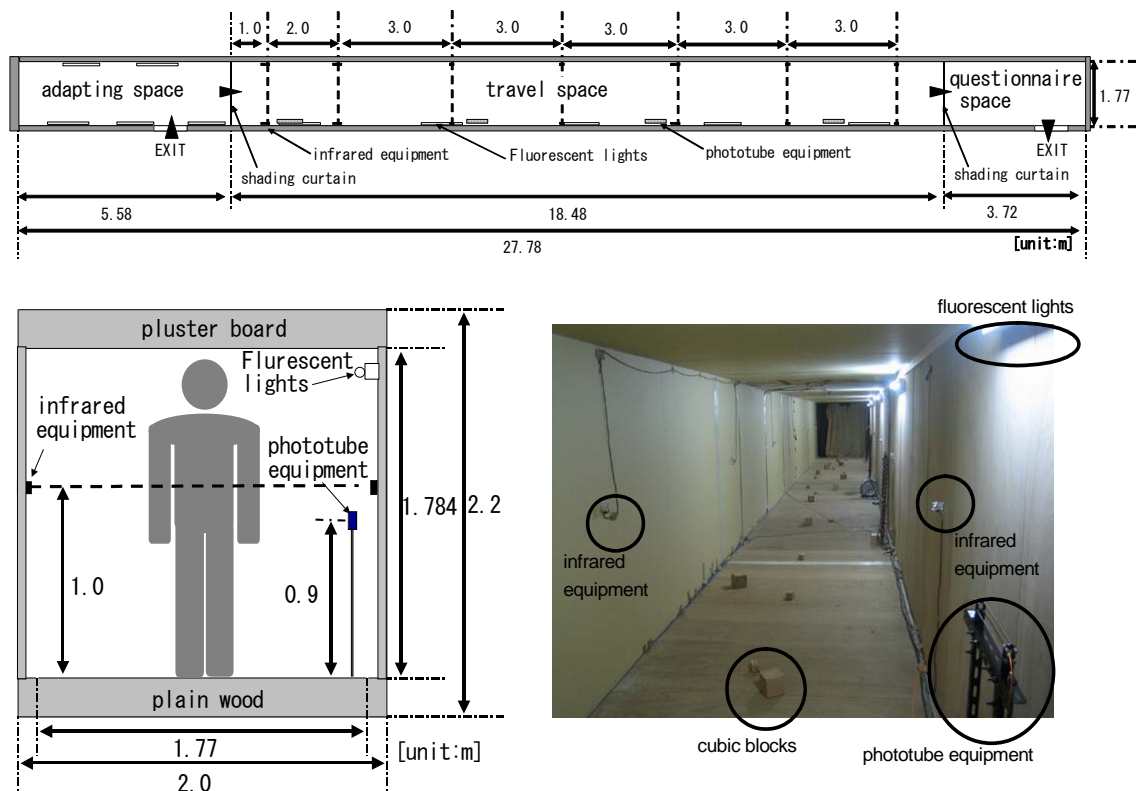


図 4-1 実験空間

#### 4-2-2. 実験手順

被験者はまず順応空間で 2.5 分間設定された照度条件に順応した後、歩行空間に入室し、床にランダムに配置された大小立方体を避けながら歩行空間の中央部を歩行する。その後評価室に入室し、表 4-1 に示す「避難経路の見易さ」「歩行し易さ」「不安感」について評価する。この設問は歩行速度と心理状態の関係を把握するために設定した。

表 4-1 歩行後の心理状態に関する評価のカテゴリー

"visibility of travel space"		"ease to walk or not"		"anxiety while walking in the travel space"	
0	No problem	0	No problem	0	No problem
1	a little difficult to see	1	a little difficult to walk	1	a little uneasy
2	difficult to see	2	difficult to walk	2	uneasy
3	very difficult to see	3	very difficult to walk	3	significantly uneasy
4	cannot see	4	cannot walk		

#### 4-2-3. 設定する視環境条件

表 4-2 に実験で設定する視環境条件を示す。歩行空間の床面照度  $E_t$  は 0.03～100[lx] に設定する。被験者の順応状態は、歩行空間の床面照度に完全に順応した定常状態（順応室床面照度  $E_a = E_t$ ）と、順応過渡過程の非定常状態の二種類に設定する。非定常状態は順応室の床面照度と歩行空間の床面照度の変化率  $RE_{adaptation}$  で取り扱う（式 4-2）。

$$RE_{adaptation} = \frac{E_a}{E_t} \quad \text{式 4-2}$$

非定常状態の実験では、順応照度変化率  $RE_{adaptation}$  を 1～10000 に設定し、歩行空間の床面照度は視認性が悪い 0.03～1[lx] についてのみ行う。なお  $RE_{adaptation}=1$  の条件は定常状態を意味する。

煙のある条件（表 4-2 の w/）では、調光器によって歩行空間の床面照度が順応室のそれと同じ値（すなわち順応は定常状態）になるよう補正した。

表 4-2 実験で設定する視環境条件

Smoke	Adaptation	$RE_{adaptation}$	Floor illuminance of travel space: $E_t$ (lx)							
			0.03	0.1	0.3	1	3	10	30	100
w/o	complete	1	●	●	●	●	●	●	●	●
w/o	incomplete	10	●	●	●	●				
		100	●	●	●	●				
		1000	●	●	●					
		10000	●							
w/	complete	1	●	●	●	●	●	●	●	●

#### 4-2-4. 被験者

視認能力を説明変数とするため、年齢の異なる高齢者 30 名（平均 70.2±3.3 才）と青年 30 名（平均 24.9±5.1 才）の被験者で実験を行う。青年被験者は大学生と研究スタッフから、高齢被験者はシルバー人材センター登録員から選択した。いずれも歩行実験に支障がない健康状態である。21 人の青年被験者と 14 人の高齢被験者は日常生活において眼鏡かコンタクトによる視力矯正を行っており、実験でもその矯正状態と

した。被験者の年齢・身長・性別について表 4-3 と図 4-2 に示す。

一般に明視三要素<sup>6)</sup>と呼ばれるのは、物体の視角[分]・順応（背景）輝度[cd/m<sup>2</sup>]・物体と背景の輝度対比であるが、秋月ら<sup>7)</sup>は人間の視認能力（視力）も視認性評価に必要な要素であることを示している。そこで本実験では、被験者の視認能力を把握した上で歩行速度結果との対応関係を抽出し、Jaschinski<sup>4)</sup>が示した歩行速度における年齢の違いについて説明することを試みる。

表 4-3 被験者

	Young		Aged	
	male	female	male	female
number	20	10	23	7
age [year]	24.2 ±4.4	26.4 ±5.7	71.0 ±3.0	67.7 ±2.7
height [cm]	176.1 ±5.3	165.7 ±4.7	165.0 ±4.4	152.8 ±4.0

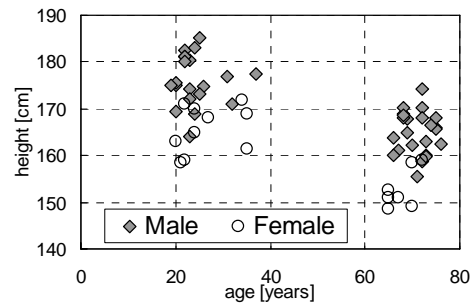


図 4-2 被験者の身長と年齢

歩行実験に先立ち、ランドルト環視力表を用いて被験者の視力測定を実施した。被験者は 1.275×0.6×2.0[m]で内装反射率 0.93 の視力測定ブースに入室し、0.1～1000[lx]の視力表の明るさに 2.5 分間順応した。視力測定ブースは遮光されていて外部からの入射光はなく、視力表の照度分布はほぼ一様である。被験者と視力表の距離は 1.5[m]である。視力表の背景反射率は 0.7 で、背景とランドルト環の輝度対比は 0.94 である。視力表は、視力値 0.1～1.9 までの 0.1 間隔の段階について、それぞれ上下左右斜め方向の合計 8 種類の切れ目方向をランダムに並べたものであり、被験者はランドルト環の切れ目方向を回答する。各々の照明状態において、切れ目方向の正答率 $\Phi'$ から偶然性を排除した真の正答率 $\Phi$ を測定結果とし（式 4-3）、ロジスティック回帰により真の正答率が 80%となる視力値を、その照明状態での視力と定義する。真の正答率 $\Phi$ のパーセント値に関わらず視力値と視力表表面照度との関係は相対的に等しくなるので、本研究では安全側の設計値を得るため 80%に設定した。

$$\Phi = \frac{8\Phi' - 1}{8 - 1} \quad \text{式 4-3}$$

実験で様々な照明状態に設定する場合にランドルト環視力表の表面照度を測光量として用いるのが簡便であり、建築空間の照明設計においてよく用いられる測光量も「照度」であるが、視力の予測には「照度」でなく「輝度」を測光量として用いるべきである。そこで視対象の反射率 $\rho$ を式 4-4 に代入して、視対象面の照度 $E$ [lx]を輝度 $L$ [cd/m<sup>2</sup>]に換算した。表 4-4 に今回の実験における照度と輝度の対応表を示す。

$$L = \frac{E\rho}{\pi} \quad \text{式 4-4}$$

表 4-4 本実験における視対象の照度・輝度・反射率の対応表

illuminance [lx]	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30	100	300	1000
floor luminance [cd/m <sup>2</sup> ] (reflectance 0.43)	0.004	0.014	0.041	0.137	0.411	1.37	4.11	13.7	—	—
test chart luminance [cd/m <sup>2</sup> ] (reflectance 0.70)	—	0.022	0.067	0.223	0.668	2.23	6.68	22.3	66.8	222.8

図 4-3 に二つの年齢層における視力と視力表背景輝度の関係を示す。同じ年齢層であっても個人差が見られるが、視力と背景輝度には正の相関が見られる。式 4-5 は両者の関係を表したものである。式中の  $L[\text{cd/m}^2]$  は背景輝度、 $VA$  は視力、 $\alpha$  は年齢に関連する係数である。式 4-5 では、全ての輝度条件において高齢者の視力は常に青年のそのの半分であることを表している。すなわち、照明環境における視認性の年齢の違いは、視力で表されると言える。前出表 4-4 を用いて歩行空間の床面照度を輝度に換算することで、ある照明状態に設定された歩行空間での被験者の視力が予測可能になる。

$$VA = \alpha \times (\log_{10} L + 1.85) \quad \because \alpha_{\text{aged}} = 0.17, \alpha_{\text{young}} = 0.34 \quad \text{式 4-5}$$

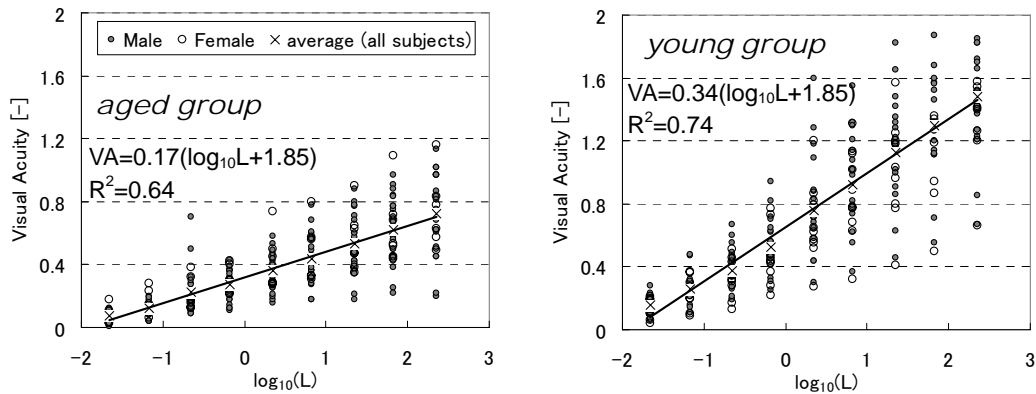


図 4-3 年齢層別背景輝度と視力の関係（左：高齢者、右：青年）

#### 4-3. 定常順応状態での歩行速度の予測

図 4-4 に移動距離と歩行速度の関係を示す。定常順応状態では、歩行空間の移動距離に対応した歩行速度の変動が見られないが、歩行速度は歩行空間の床面照度の増加に伴い速くなる傾向が、両年齢層で確認される。そこでまずは被験者毎に一つの照明

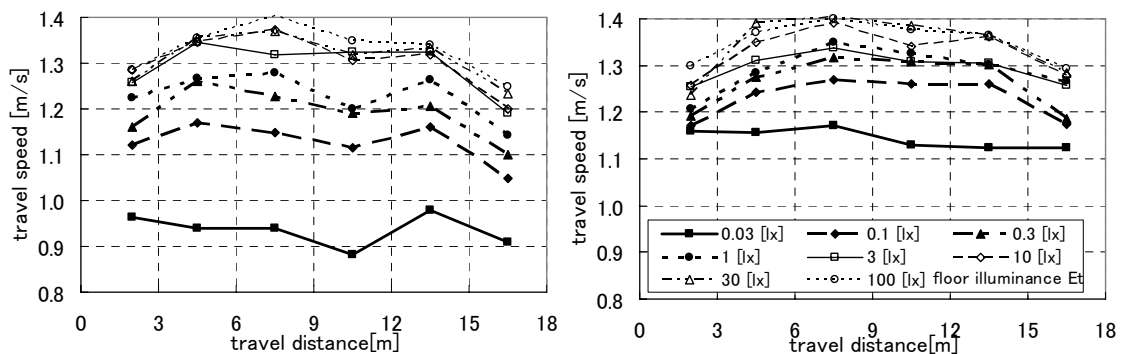


図 4-4 定常順応状態での移動距離と歩行速度の関係（左：高齢者、右：青年）

条件の結果について移動距離 6 箇所得られた歩行速度を平均し、それを年齢層毎にさらに平均した値を用いて考察を進める。

図 4-5 に床面照度と歩行速度の関係を示す。床面照度が 3.0[lx]より低い条件で、年齢層による歩行速度の違いが見られ、Jaschinskiの結果<sup>4)</sup>と同様の傾向を示している。床面照度が 3.0[lx]以上になれば両者の歩行速度はほぼ等しい。

歩行空間床面と視力表の反射率が異なるので、歩行空間の反射率と照度から輝度を換算し、同一輝度値での視力 VA（輝度対比C=0.94）を式 4-5 より求めて歩行速度と対応させた。結果を図 4-6 に示す。図 4-5 で見られた年齢層による違いが図 4-6 では見られなくなり、歩行速度と視力には年齢層に関わらず共通した関係が成立すると考えられる。最終的に、定常順応状態での歩行速度  $v_o$ [m/s]と視力 VAの関係は、式 4-6（相関係数 $R^2=0.80$  および 0.86）で表される。災害時の照明状態を把握し避難者の視力が予測できれば、その時の避難歩行速度を求めることが可能である。

$$v_o = \begin{cases} 1.56 \times VA^{0.12} & (VA < 0.25) \\ 1.32 & (VA \geq 0.25) \end{cases} \quad \text{式 4-6}$$

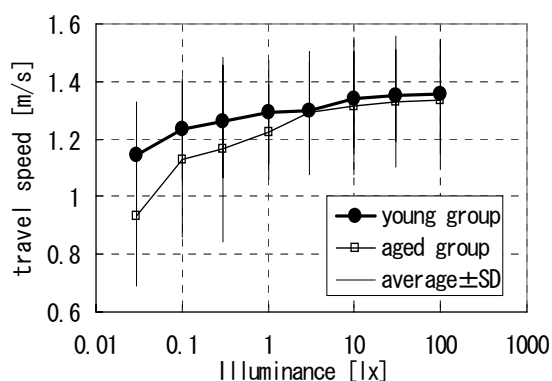


図 4-5 歩行空間の床面照度と歩行速度の関係

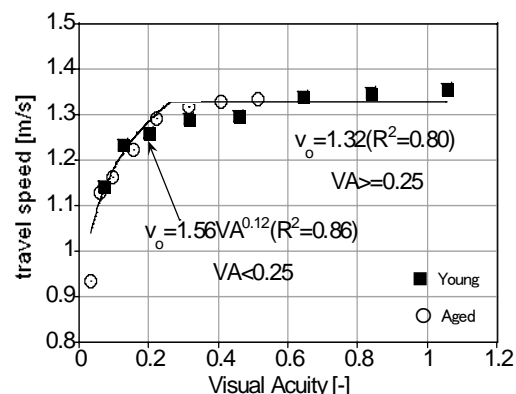


図 4-6 歩行速度と視力の関係

#### 4-4. 非定常順応状態での歩行速度の予測

歩行空間の床面照度 0.03[lx]の条件での、非定常順応状態における移動距離と歩行速度の関係を図 4-7 に示す。高齢者での順応室の照度と歩行空間の照度が大きく異なる条件では、移動距離が長くなるほど歩行速度が増加し定常順応状態のそれに近づく。安定した定常順応時に比べて、順応過渡過程では視認性が低下し、それは照明状態の変化が大きいほど顕著になると考えられる。そこで最も順応の変化が激しい、歩行空間入室直後（1～3[m]の区画）の歩行速度に着目して考察を進める。

順応室と歩行空間の照度の違いを、順応照度変化率  $RE_{adaptation}$  として前出式 4-2 で定義した。歩行速度における順応の影響を示す指標として、さらに式 4-7 に順応変化による歩行速度変化率  $Rv_{adaptation}$  を定義する。式中の  $v_o$ [m/s] は定常順応状態での歩行速度で、 $v_i$ [m/s] は非定常順応状態での歩行速度である。

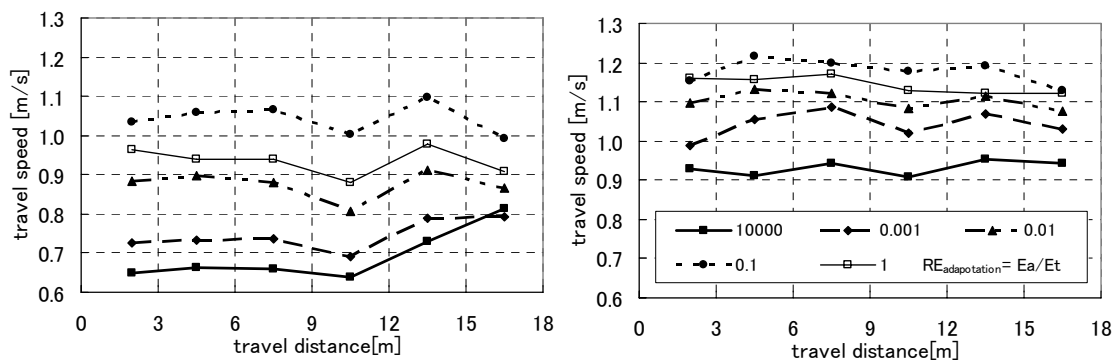


図 4-7 非定常順応状態での移動距離と歩行速度の関係(歩行空間 3[lx]、左：高齢者、右：青年)

$$Rv_{adaptation} = \frac{v_i}{v_0} \quad \text{式 4-7}$$

順応過渡過程の影響が最も抽出しやすい歩行空間入室直後（1～3[m]の区画）での、歩行空間の床面照度  $E_t$ [lx]、順応照度変化率  $RE_{adaptation}$ 、および順応変化による歩行速度変化率  $Rv_{adaptation}$  の結果を図 4-8 に示す。なお  $Rv_{adaptation}$  は被験者一人一人の結果をまず求めた上で、年齢層毎に平均した値であり、1 かそれより小さい値となるべきであるが、個々の歩行速度が不安定であるので、いくつかの結果は 1 より大きい値を示している。全体的には、順応変化による歩行速度変化率  $Rv_{adaptation}$  は、歩行空間の照度が低く順応照度変化率  $RE_{adaptation}$  が大きいほど低下する傾向が見られる。またその傾向は青年よりも視力の低い高齢者の方が顕著である。

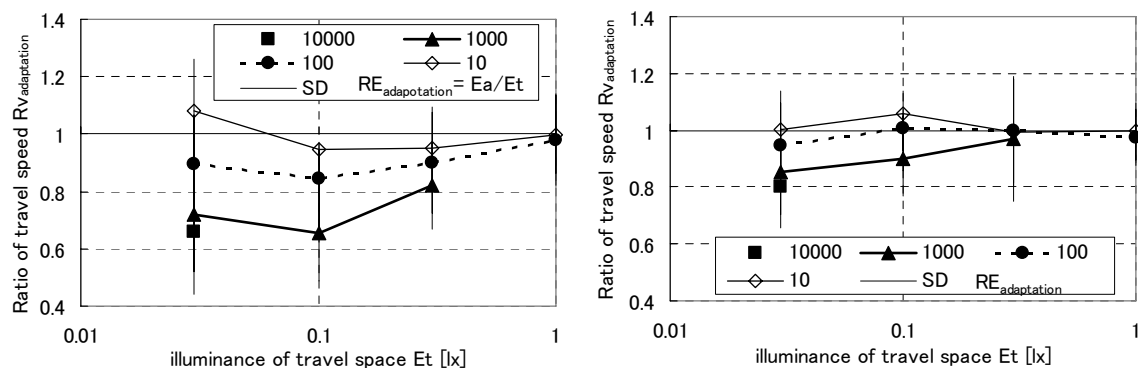


図 4-8 歩行空間の床面照度・順応変化率および順応変化による歩行速度変化率の関係  
(区画：入室後 1～3[m]、左：高齢者、右：青年)

図 4-8 で見られた年齢層の違いも視力で説明できると考えられる。そこで歩行空間床面照度下での視力  $VA$  (輝度対比  $C=0.94$ ) に換算して、視力と順応照度変化率  $RE_{adaptation}$  および順応変化による歩行速度変化率  $Rv_{adaptation}$  の相互関係について図 4-9 に示す。 $RE_{adaptation}=10$  (すなわち順応室の照度が歩行空間の照度の 10 倍となる) 条件では、応変化による歩行速度変化率  $Rv_{adaptation}$  が 1 になると考えられる。また  $RE_{adaptation}=100$  及び  $RE_{adaptation}=1000$  の時には、式 4-8 の回帰式が導かれる。この式 4-8 と前出式 4-6 を組み合わせることで、非定常順応状態の歩行速度を予測することが可能になる。なお式

の  $E_t$  [lx] および  $E_a$  [lx] は歩行空間および順応室の床面照度、 $v_o$  [m/s] および  $v_i$  [m/s] は定常順応状態および非定常順応状態での歩行速度、 $VA$  は歩行空間の照明状態における視力である。

$$\begin{aligned}
 & \text{if } VA < 0.25, \\
 & Rv_{adaptation} = \frac{v_i}{v_o} = \begin{cases} 1.12^{f(RE_{adaptation})} \times VA^{0.08 f(RE_{adaptation})} & (RE_{adaptation} \geq 100) \\ 1 & (RE_{adaptation} < 100) \end{cases} \\
 & f(RE_{adaptation}) = \log_{10} RE_{adaptation} - 1 = \log_{10} \frac{E_a}{10 \times E_t} \\
 & \text{and if } VA \geq 0.25 \\
 & Rv_{adaptation} = 1
 \end{aligned}
 \tag{式 4-8}$$

$$\therefore v_i = \begin{cases} 1.56 \times 1.12^{f(RE_{adaptation})} \times VA^{\{0.08 f(RE_{adaptation}) + 0.12\}} & (RE_{adaptation} \geq 100, VA < 0.25) \\ 1.56 \times VA^{0.12} & (RE_{adaptation} < 100, VA < 0.25) \\ 1.32 & (VA \geq 0.25) \end{cases}$$

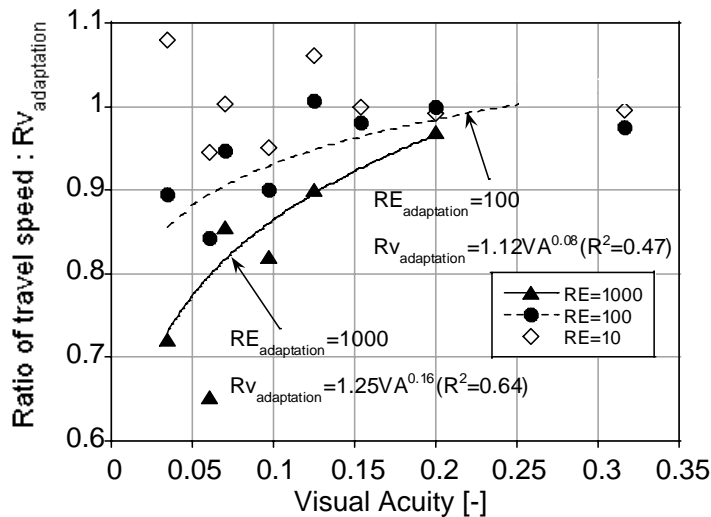


図 4-9 非定常順応状態での視力・ $Rv_{adaptation}$ ・ $RE_{adaptation}$ の相互関係

#### 4-5. 煙の中での歩行速度の予測

続いて定常順応状態で煙の中における歩行速度について結果を示す。図 4-10 に煙の無い状態の歩行速度と、煙が有る状態の歩行速度を比較する。空間内に煙が有る場合の方が、煙がない場合に比べて歩行速度が顕著に低下しており、神の結果<sup>8)</sup>と同様である。また前出図 4-5 では歩行空間の床面照度 3.0[lx]以上で年齢層による違いが見られなかったが、図 4-10 では 3.0[lx]以上でも両者に違いが見られており、歩行空間の照度が上がるほど歩行速度が速くなる傾向が示されている。なお青年の歩行速度は高齢者のそれよりも速い。



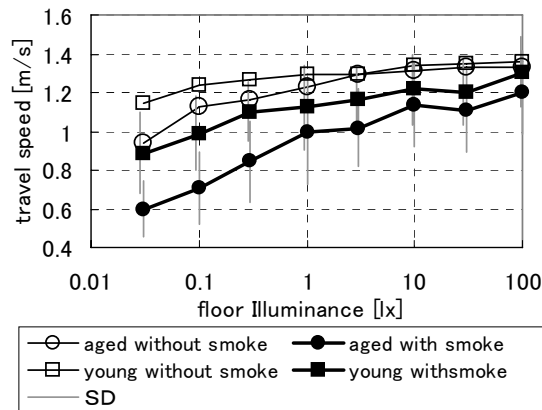


図 4-10 煙の有無による歩行速度の違い

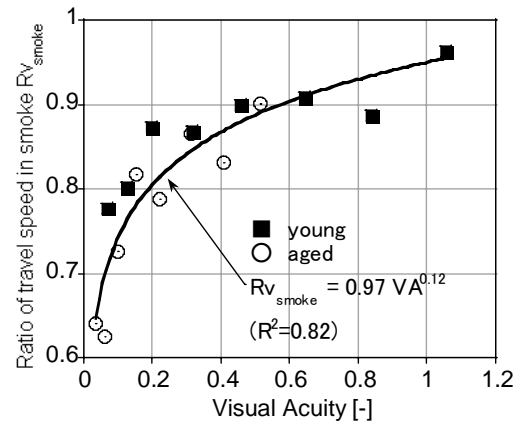


図 4-11 煙の有無による歩行速度変化率と視力

同じ照度条件であっても、被験者は煙の無い状態より有る状態の方がよりゆっくりと歩行する。そこで煙の有無による歩行速度の変化率 $Rv_{smoke}$ を式 4-9 で定義する。式の $v_o$ [m/s]および $v_s$ [m/s]は煙が無い状態および有る状態での歩行速度である。

$$Rv_{smoke} = \frac{v_s}{v_o} \quad \text{式 4-9}$$

図 4-10 の年齢層による違いも、やはり視力によって説明できると考えられる。そこで煙の有無による歩行速度変化率 $Rv_{smoke}$ と歩行空間床面照度下での視力 $VA$ (輝度対比 $C=0.94$ ) の関係を求め、図 4-11 に示す。なお $Rv_{smoke}$ は被験者一人一人の結果をまず求めた上で、年齢層毎に平均した値である。図 4-11 では年齢層の違いが払拭されており、煙の有無による歩行速度変化率 $Rv_{smoke}$ と視力には年齢に関わらず共通した関係式 4-10 が成立する( $R^2=0.82$ )。式の $v_o$ [m/s]および $v_s$ [m/s]は煙が無い若しくは煙が有る定常順応状態での歩行速度であり、 $VA$ は歩行空間の照明状態における視力である。前出式 4-5 では $VA \geq 0.25$ の条件で収束していたが、式 4-10 では視力が高い条件でも $Rv_{smoke}$ は増加傾向にある。

$$Rv_{smoke} = \frac{v_s}{v_o} = 0.97 \times VA^{0.12}$$

$$\therefore v_s = \begin{cases} 1.51 \times VA^{0.24} & (VA < 0.25) \\ 1.28 \times VA^{0.12} & (VA \geq 0.25) \end{cases} \quad \text{式 4-10}$$

式 4-10 は光学的煙濃度 $Cs$ が $0.68[1/m]$ の時の結果であり、 $Cs$ 値がより高い場合は視認性が低下するため、 $Rv_{smoke}$ も低下すると予想される。 $Cs=0$ の時は $v_s = v_o$ となり $Rv_{smoke}=1$ となる。式 4-10 に光学的煙濃度の変数を組み込むためには、異なった煙条件についての追加検討が必要である。

#### 4-6. 歩行速度と心理状態の関係

本項では歩行速度と心理状態の関係について示す。図 4-12 に煙の無い定常順応状態での高齢者の評価結果を示す。図の横軸は歩行空間の床面照度で、縦軸は 30 人の被験者における各評価カテゴリーの回答率である。全ての評価において、床面照度が高くなるほど否定的な評価カテゴリーの回答率は小さくなり、「問題ない」の回答率が増加する。避難時に問題となる条件を抽出するため、以後は否定的な評価の回答率（「問題ない」以外の回答全ての、全回答数に対する割合）を用いて考察を進める。

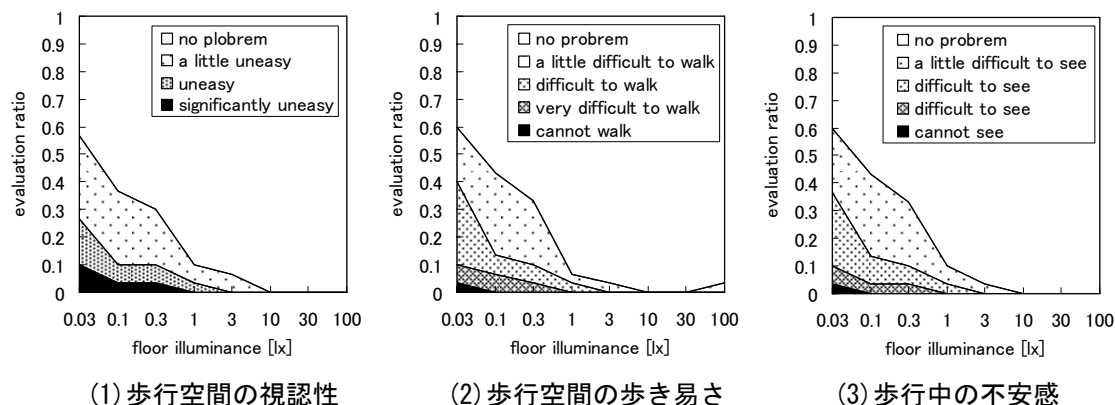


図 4-12 歩行空間の床面照度と心理状態の関係（高齢者、煙の無い定常順応状態）

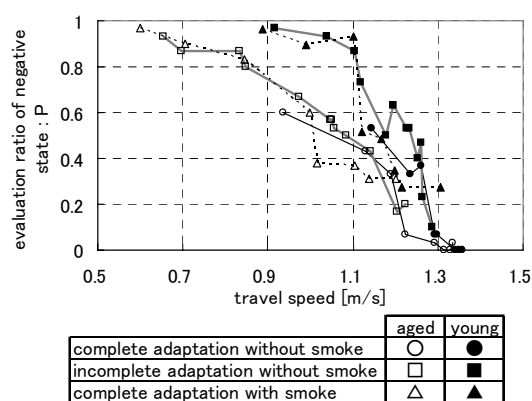


図 4-13 歩行空間の歩き難さと歩行速度

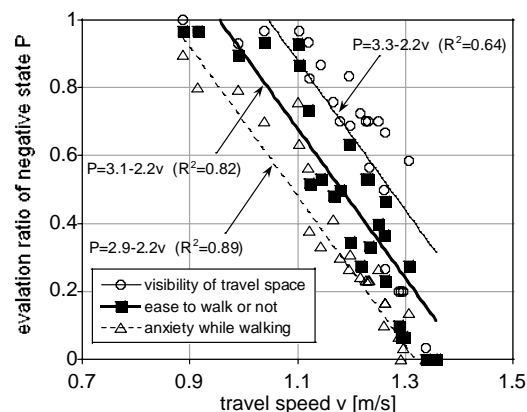


図 4-14 歩行速度と否定的評価の回答率（青年）

図 4-13 に年齢層・順応状態・煙の有無の条件毎の、歩行速度と“歩行空間の歩き易さ”における否定的な評価（すなわち歩き難さ）の回答率の関係を示す。どの条件においても、歩行速度の増加に伴い否定的な評価の回答率は減少する傾向が見られ、歩行速度と歩行時の心理評価の間には一定の関係が存在すると考えられる。また図では高齢者は青年と比較して否定的な評価を避ける傾向が見られるので、安全側設計を行うために青年の評価結果のみを以後の考察で用いる。

本実験で取り扱った 3 種類の心理評価（表 4-1）における否定的評価の回答率  $P$  と歩行速度  $v$  [m/s] の関係を図 4-14 に示すと、どの心理評価においても強い相関が認められ、式 4-11 で表すことができる。 $k_1$  と  $k_2$  は心理評価毎に決まる定数である：“歩行空間の見

難さ” ( $k_1, k_2$ ) =(3.3、1.05) “歩行空間の歩き難さ” (3.1、0.95) “歩行中の不安感” (2.9、0.86)。

$$P = \begin{cases} k_1 - 2.2v & (v \geq k_2) \\ 1 & (v < k_2) \end{cases} \quad \text{式 4-11}$$

歩行速度が速くなるほど視認性が高い歩行空間であることを意味している。歩行空間の視環境に最も敏感に反応する心理評価は“歩行空間の見難さ”であり、同じ歩行速度における否定的評価の回答率が3種類の心理評価の中で最も高い値を示している。“歩行中の不安感”の回答率が最も低い値となるのは、3種の中では高次の評価で他の要因が影響していることによると考えられる。式中の $k_2$ は、歩行速度が1.05[m/s]以下になる歩行空間では、全ての被験者が歩行空間を「見難い」と感じ、0.95[m/s]以下では「歩き難い」と感じ、0.86[m/s]以下では「不安」を感じることを表している。

#### 4-7. 避難経路の視力に基づく避難行動予測モデル

前項までに示してきた様々な関係式をダイアグラムにまとめたものが図 4-15 である。この図を用いることで、火災煙を含む様々な避難視環境下での避難歩行速度や心理状態を予測することが可能である。A図は歩行空間の照度・反射率・輝度の関係、B図は輝度と視力の関係（高齢者と青年）、C図は順応状態が変化する場合の歩行速度（定常順応時は $RE_{adaptation} < 100$ ）、D図は煙中（ $C_s=0.67[1/m]$ ）の歩行速度、E図は歩行速度に応じた心理評価の読み取り図である。ダイアグラムに図Eが二度表れるのは、順応状態と煙の有無について心理状態を読み取り易くするためである。B図では二つの年齢層のみ設定しているが、視力と年齢に強い相関があるので、中間の年齢の視力もB図から推定することができる。

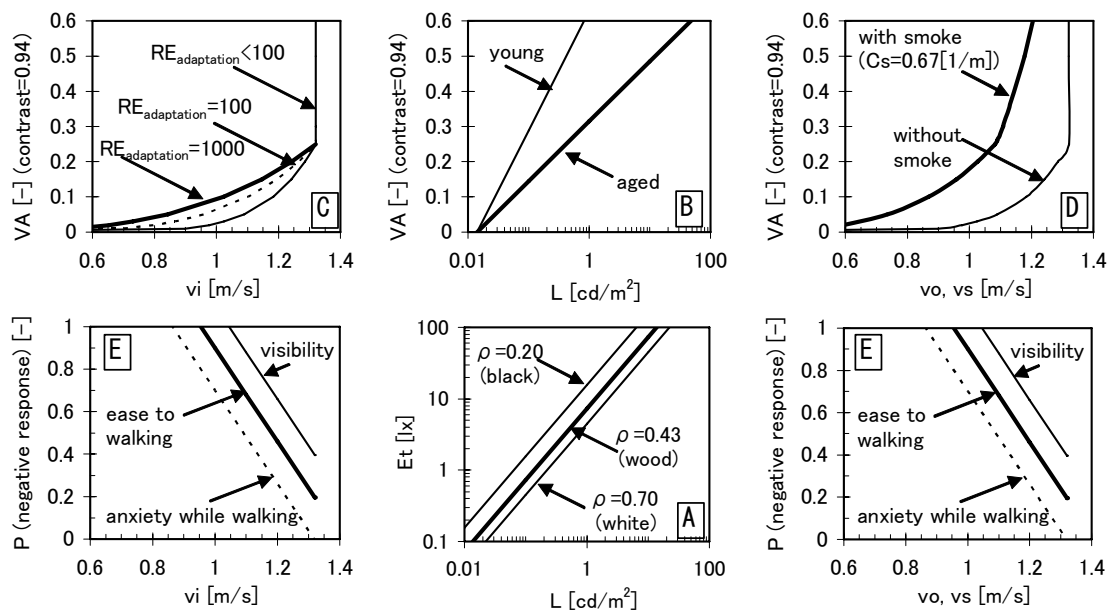


図 4-15 歩行空間での視力に基づく歩行速度及び心理状態の計算モデル

図 4-15 の使用方法について、図 4-16 と図 4-17 に例示する。

図 4-16 は非定常順応状態での歩行速度および心理状態の計算過程について示したものである。ある高齢者が床面照度  $1000[\text{lx}]$  の照明環境（一般的な事務所空間）に順応していた直後に、停電等で非常用照明のみから成る  $1.0[\text{lx}]$  の環境に曝されると仮定する。床面が木材仕様（反射率  $0.43$ ）の空間の床面照度が  $1.0[\text{lx}]$  の時の床面の輝度は  $0.14[\text{cd}/\text{m}^2]$  で、その空間での高齢者の視力は  $0.17$  である。順応照度変化率は  $RE_{\text{adaptation}}=1000$  であるので、歩行速度は  $1.19[\text{m}/\text{s}]$  となり、同じ視力の高齢者の約 7 割が見難いと感じるような空間であることがわかる。

もしその高齢者が停電前に床面照度  $30[\text{lx}]$  の環境に順応していたら、順応照度変化率は  $RE_{\text{adaptation}} < 100$  であるので、歩行速度は  $1.26[\text{m}/\text{s}]$  に上がり、同じ視力の高齢者が見難いと感じる割合も 55% に軽減される。

また高齢者でなく青年であった場合、停電前に曝される照明状態に関係なく歩行速度は  $1.34[\text{m}/\text{s}]$  となり、高齢者と比べて迅速に避難できることがわかる。

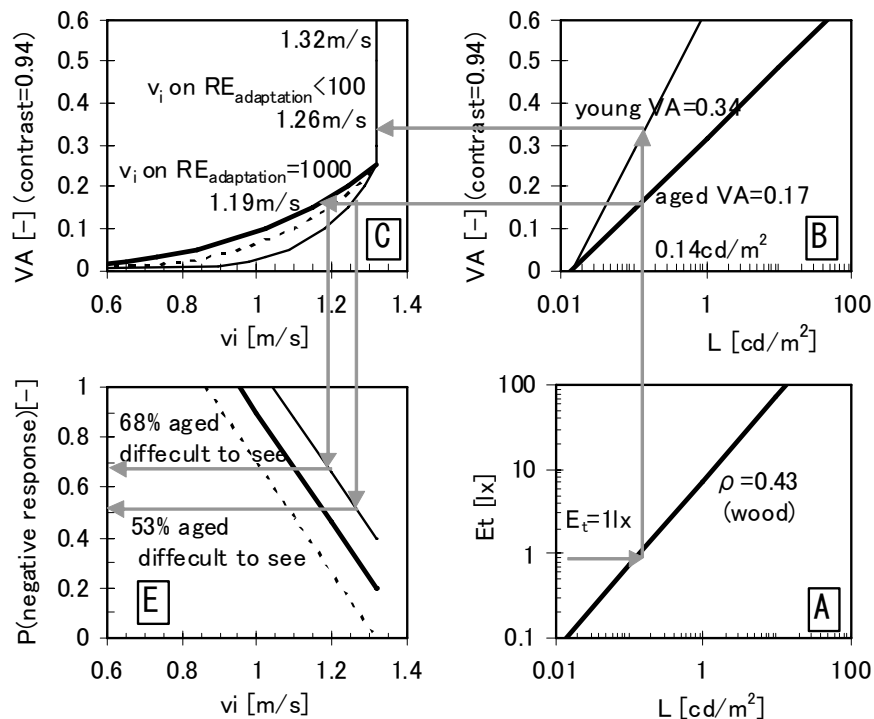


図 4-16 非定常順応状態での歩行速度の計算過程

図 4-17 は煙の有る空間での歩行速度および心理状態の計算過程について示したものである。ある青年が木材仕様（反射率  $0.43$ ）の空間で床面照度  $2.0[\text{lx}]$  の照明環境に居る場合、床面の輝度は  $0.27[\text{cd}/\text{m}^2]$  で、その空間での視力は  $0.44$  である。煙がない状態では歩行速度は  $1.32[\text{m}/\text{s}]$  となり、特に否定的評価を感じない。もし空間に  $C_s=0.67[1/\text{m}]$  の火災煙があれば、歩行速度は  $1.16[\text{m}/\text{s}]$  に下がり、同じ視力の青年の 35% が不安に感じるような空間であることがわかる。

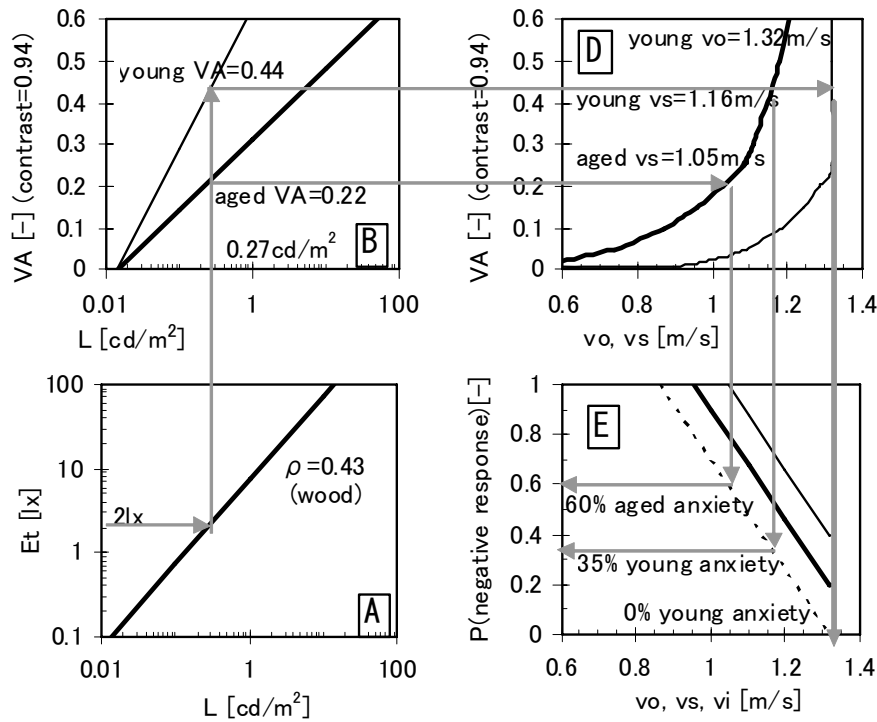


図 4-17 煙のある状態での歩行速度の計算過程

また青年でなく 65 歳以上の高齢者であった場合、歩行速度は 1.05[m/s]まで下がり、同じ視力の高齢者の 60%が不安に感じるような悪環境であることがわかる。

以上、避難経路の視力に基づく避難行動予測モデルの使用方法を示した。

#### 4-8. まとめ

本章では、避難者の行動が照明環境と避難者の視力といった視環境条件によって予測可能なことを示した。

定常順応状態における歩行速度  $v_o$ [m/s]は、年齢によらず、歩行空間の照度での歩行者の視力  $VA$ によって次式で定まることを明らかにした。

$$v_o = \begin{cases} 1.56 \times VA^{0.12} & (VA < 0.25) \\ 1.32 & (VA \geq 0.25) \end{cases}$$

順応空間＞歩行空間のような非定常順応状態での歩行速度  $v_i$ [m/s]は、年齢によらず、歩行空間での歩行者の視力  $VA$ と、順応照度の変化率 ( $RE_{adaptation}$ =順応室の床面照度  $E_a$ ÷歩行空間の床面照度  $E_t$ ) によって次式で定まることを示した。

$$v_i = \begin{cases} 1.56 \times 1.12^{f(RE_{adaptation})} \times VA^{0.08 f(RE_{adaptation}) + 0.12} & (RE_{adaptation} \geq 100, VA < 0.25) \\ 1.56 \times VA^{0.12} & (RE_{adaptation} < 100, VA < 0.25) \\ 1.32 & (VA \geq 0.25) \end{cases}$$

また、光学的煙濃度  $C_s=0.68[1/m]$  の時の歩行速度  $v_s[m/s]$  は、年齢によらず、歩行空間での歩行者の視力  $VA$  によって次式で定まることを示した。

$$v_s = \begin{cases} 1.51 \times VA^{0.24} & (VA < 0.25) \\ 1.28 \times VA^{0.12} & (VA \geq 0.25) \end{cases}$$

さらに、不安感等の歩行空間を歩く時に生じる否定的評価の回答率  $P$  と歩行速度  $v[m/s]$  には、順応状態や煙の有無に関わらず、次の関係式が定まることを示した。なお式中の  $(k_1, k_2)$  は心理評価毎に決まる定数である：歩行空間の見難さ  $= (3.3, 1.05)$ 、歩行空間の歩き難さ  $= (3.1, 0.95)$ 、歩行中の不安感  $= (2.9, 0.86)$ 。

$$P = \begin{cases} k_1 - 2.2v & (v \geq k_2) \\ 1 & (v < k_2) \end{cases}$$

歩行速度は年齢や煙の有無に関係なく歩行空間での視力で求まる。定常順応状態もしくは非定常順応状態において、歩行空間における避難者の視力が  $0.25$  以下になると歩行速度は低下する。照明が十分であっても煙の存在によって歩行速度は低下する。最終的に歩行空間での避難者の視力に基づく歩行速度および心理状態の予測モデルを構築し、ダイアグラムに示した。もし火災時や停電などの照明条件下での視力が把握できれば、このモデルを用いて避難者行動を予測することが可能である。

しかし本実験で使用した空間は直線通路で歩きやすく出口が見付けやすいといった、実際の災害時避難と比べて容易なものであった。複雑で規模の大きい建築空間で火災煙に曝された中での実際の避難は、はるかに困難な状況であると思われる。また実験では天井・床・壁の内表面反射率は全て均一で視野の輝度分布が単純な性状あったが、実際には内表面各部位の反射率が異なり、視野輝度分布も複雑である。それゆえ、多くの前提条件によって構築された本予測モデルを使用する際は注意を要する。

#### 参考文献：

- 1) CIE Standards 014-4/E、Emergency lighting、2007
- 2) (社)日本照明器具工業会、非常用照明器具技術指針 JIL5501、2001 改正
- 3) R. C. Simmons : Illuminance, diversity and disability glare in emergency lighting、Lighting Research and Technology、Vol.7、No.2、pp.125-132、1975
- 4) Wolfgang Jaschinski : Conditions of emergency lighting、Ergonomics、Vol. 25、pp.363-373、1982
- 5) Yuki Akizuki、Takeyoshi Tanaka and Kohei Yamao : Calculation model for travel speed and psychological state in escape routes considering luminous condition、smoke density and evacuee's visual acuity、Fire Safety Science -Proceedings of the 9th International Symposium、pp.365-376、2008
- 6) 日本建築学会：建築環境工学実験用教材、丸善出版、2011

- 7) 秋月有紀・井上容子：明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討、日本建築学会誌計画計論文集、No.562、pp.15-22、2002
- 8) 神忠久・山田常圭：煙の中でのものの見え方（その2）、照明学会誌、Vol.59、No.2、pp.28-34、1980





## 第5章 火災煙の粒子の付着

### 5-1. はじめに

火災時の避難計画を検討する上で重要なのは、煙の伝搬とそれに伴う視認性悪化の把握である。火災時の視認性へ影響を及ぼすものとして我々が考慮しなければいけない要因は、停電や煙による不明瞭さである。非常用標識が避難時に効果的に機能するためには、どのような状況においても十分な視認性を確保しなければならない。それゆえ、避難者の視認性を定量的に把握するために、火災煙下での視覚刺激の計算方法を確立する必要がある。

火災において、我々は視覚刺激に対する煙の吸収と散乱を取り扱う必要があり、それらは明視三要素の背景輝度や視対象と背景の輝度対比に影響する。さらに火災後の現場で確認されるように、火源から放出された煙粒子は壁面・光源・標識の表面など、煙に曝された物体に大量に付着する。この粒子の付着によって光源表面のガラスの透過率が下がり光量も下がり、また壁面反射率が下がることにより拡散光成分が影響を受ける。このように煙粒子の付着は視認性に大きく影響することは当然予想されることだが、煙の付着に関する数量的把握を検討した研究は殆ど見られない。

そこで本章では、煙粒子の付着現象について燃焼実験で検討し、火災煙に暴露された空間の物体表面に対する煙粒子の付着量予測モデルを構築する<sup>1)2)</sup>。

### 5-2. 実験

#### 5-2-1. 実験装置

実験は外光をほぼ完全に遮光する暗室（ $2 \times 2 \times 4$ [m]）の中に、図 5-1 に示す実験装置を設置し、装置内に煙が存在する状態での発光型視対象輝度を測定して煙の光学的濃度を算出し、一定時間煙に曝された装置側面の煙の付着量を測定する。

実験装置の大きさは縦横共に 0.8[m]で奥行きを 0.25[m]間隔で 0.75～2.0[m]まで変えられるものだが、今回の実験では最長の 2.0[m]の状態を使用した。装置本体は耐熱性の珪酸カルシウムから成り、壁面内装反射率は 0.038 である。

Side-Bには0.12[m]角の大きさの9枚の耐熱ガラス又はアクリルのパネルがはめ込まれており、一枚ずつ取り外すことができるので一定時間毎の煙の付着による透過率の変化を測定することが可能である。パネルに2種類の材料を使用しているのは、付着に対する材料の影響を検討するためであり、光源および避難誘導灯に一般的に使用されているガラスとアクリルを選択した。Side-Aのガラスは実験中取り外すことはできない。耐熱ガラスの初期透過率 $\tau$ は 0.923 でアクリルパネルのそれは 0.951 である。耐火ガラスとアクリルの表面は平滑である。

温度分布を把握するため、実験装置の Side-B 面側の内側壁隅に、鉛直方向 0.05[m]間隔で 15 本の熱電対を設置している。



面側のガラス又はアクリル板（以後、B面パネルと称す。特に区別しない場合は単にパネルと称す）を一枚ずつ交換し、煙の曝露時間に対応したB面パネルの透過率減衰から煙の付着量を把握した。試験回数は、灯油4回、ポリウレタン2回、綿5回である。

#### 5-2-4. 実験装置の性能

火災現象ではエネルギーの移動が活発であり、火災室内の上下方向温度分布が安定状態になると比較的一様な上・下部層に分離するという二層ゾーン煙流動予測モデルにおいては、各層の内部は活発な混合のため、温度や化学種濃度などの物理的性状が一様になっていると考えられている<sup>6)</sup>。

図5-2に実験装置内の温度上昇分布を示す。記号の $\Delta T_{h=0.05}$ は高さ0.05[m]の位置での温度上昇を意味する。 $\Delta T_{h=0.05}$ から $\Delta T_{h=0.75}$ の高さによる温度差が僅かに見られるが、ファンで十分攪拌させていたため、煙層は形成されていないと判断でき、実験装置内の煙の濃度分布がほぼ一様であると見なすことができる。

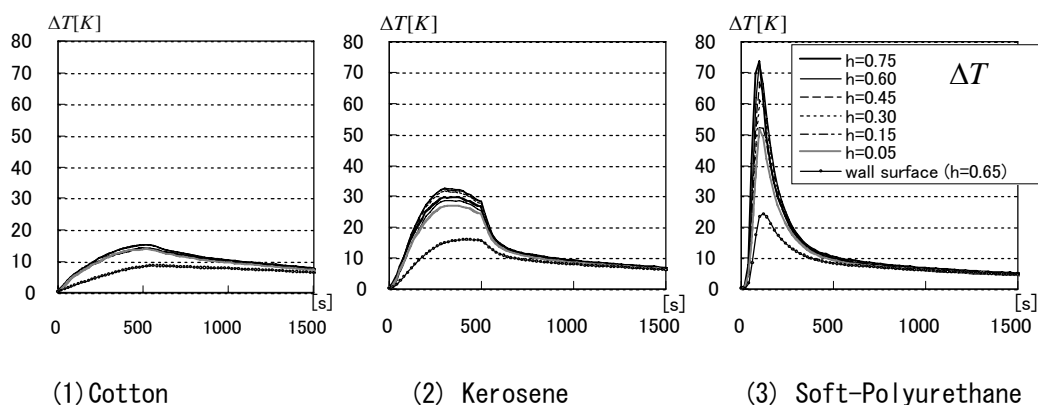


図5-2 実験装置内の温度分布（自然換気）

図5-3にSide-Aのガラス面でのSide-Bの9枚のB面パネルと対応する位置における煙粒子付着後の透過率 $\tau$ の分布を図5-3に示す。図中の縦軸は9点の透過率平均値と各点の透過率の差を示している。透過率の差は極僅かであり（±0.06）、煙粒子付着後の透過率は位置の影響を考慮する必要なく等しいと考えることができる。

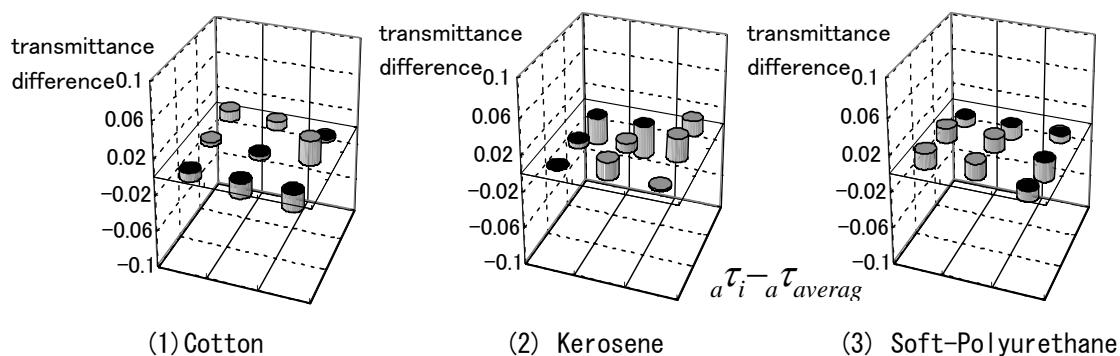


図5-3 煙粒子の付着による透過率変動の分布（自然換気）

### 5-3. 煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ の導入

#### 5-3-1. $\zeta$ の定義

本研究では、煙粒子の付着 $\zeta$ による輝度減衰を、B面パネルの透過率の変化で把握する。B面パネルの初期透過率 ${}_0\tau$  ( $0 < {}_0\tau \leq 1$ )と煙粒子付着後の透過率 ${}_a\tau$  ( ${}_a\tau \leq {}_0\tau$ )は、初期輝度 $L_0[\text{cd/m}^2]$ と、煙付着前後でのB面パネル透過後のそれぞれの輝度 $L_1[\text{cd/m}^2]$ と $L_2[\text{cd/m}^2]$ により式 5-1 で求まる。

$${}_0\tau = \frac{L_1}{L_0}, \quad {}_a\tau = \frac{L_2}{L_0} \quad (L_0 \geq L_1 \geq L_2) \quad \text{式 5-1}$$

煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ は、透過後の輝度の違いで表されるが、透過率を用いると最終的に式 5-2 で表すことができる (図 5-4)。

$$\zeta = \frac{L_1 - L_2}{L_1} = 1 - \frac{L_2}{L_1} = 1 - \frac{{}_a\tau}{{}_0\tau} \quad \text{式 5-2}$$

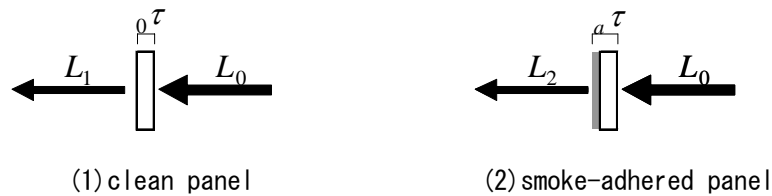


図 5-4 煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ の定義

#### 5-3-2. 煙粒子の付着における付着対象材料の影響

B面パネルの耐熱ガラスとアクリルにおいて煙粒子の付着を比較したところ(図 5-5)、アクリル板の減光率の方が大きい結果も見られたものの全体的には両者に顕著な差は認められないと判断し、以後の結果はパネルの種類を区別せずに解析する。

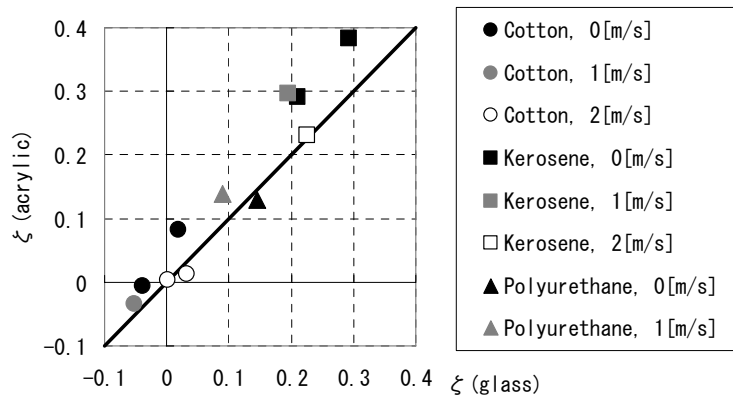


図 5-5 煙粒子の付着における付着対象材の比較

### 5-4. 煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ と光学的濃度 $Cs$ の関係

本実験において、発光型視対象と輝度計の前面に位置するB面パネルに煙粒子が付着し初期輝度 $L_0[\text{cd/m}^2]$ が $L_0(1-\zeta)^2$ に減少することを考慮して、Lambert・Beerの法則<sup>7)</sup>を変形した式 5-3 で装置内の煙の光学的濃度  $Cs [1/\text{m}]$ を算出する。

$$C_s = -\frac{1}{D} \log_e \frac{L_t}{L_0(1-\zeta)^2} \quad \text{式 5-3}$$

図 5-6 に煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ 、式 5-3 により求めた煙の光学的濃度 $C_s$ （参考まで実測輝度値 $L_t$ も示す）、実験装置内の温度上昇 $\Delta T_{room}$ [K]、および実験装置内温度と壁面温度の温度上昇の差（ $\Delta T_{room} - \Delta T_{wall}$ ）[K]の結果の例を示す。全ての結果をわかりやすく表示するため、図中の輝度と温度差はいずれも常用対数に変換して表示している。また図中のプロットは図 5-1 のSide-B面側の 9 つのパネルを交換した時期を示している。煙粒子が良く付着する灯油の結果では（図 5-6(2)） $\zeta$ と $C_s$ の対応が確認できる。

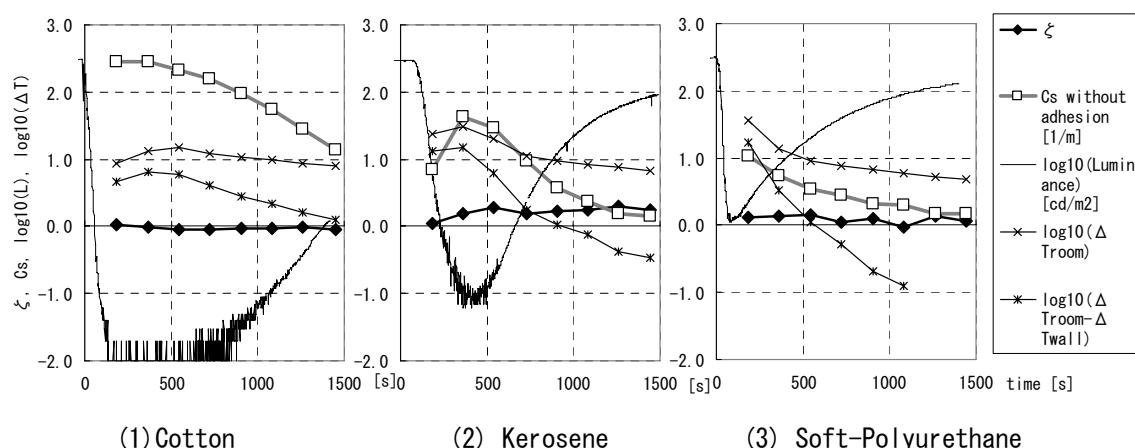


図 5-6 実験結果（自然換気＝排気流速 0[m/s]）

煙粒子の付着は煙中に含まれる煙粒子密度と曝露時間によって決まると考えられる。また煙粒子が互いに重なり合わない時は、煙粒子密度は気体の単位重量当りに含まれる煙粒子などによる吸収断面積 $\gamma_s$ [m<sup>2</sup>/kg]と比例すると考えられるので<sup>8)9)</sup>、煙粒子密度は煙の光学的濃度とも比例すると考えられる。そこでB面パネル交換時に求められる $C_s$ を総曝露時間で積分して $\zeta$ との関係を示した結果が図 5-7 である。なお実験装置内の温度上昇が小さい場合には一部B面パネル設置位置の影響がみとめられたので、図 5-6 で取り扱うデータは火源燃焼時（ $\Delta T_{room} - \Delta T_{wall}$ ） $\geq 2.0$ [K]のものを用了。

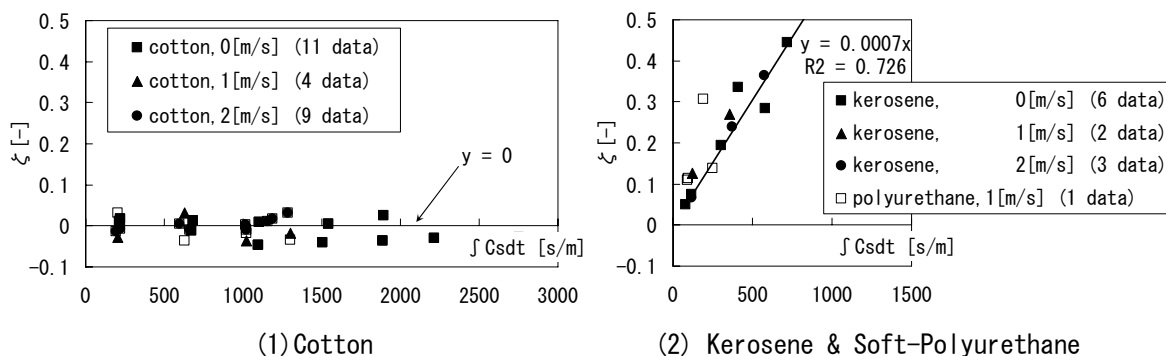


図 5-7 煙粒子の付着による減光率 $\zeta$ と光学的煙濃度 $C_s$ の関係

図 5-6(1)のくん焼燃焼させた綿の結果は、煙の光学的濃度の時間積分量が大きくなっても、 $\zeta$ は0で変化せず、煙の付着が生じないことを示している。一方、有炎燃焼させた灯油とポリウレタンの結果では、 $\int C_s dt$ と $\zeta$ の相関が高く、式 5-4 で表わすことができる。図 5-7 では排煙速度の影響は小さく、データ数が少ないポリウレタンの結果は灯油と同じ傾向を示しているので、これらをまとめて火源毎の付着係数  $\eta$ [m/s]を求め、式 5-5 に示す。

$$\zeta = \eta \int C_s dt \quad \text{式 5-4}$$

$$\eta = \text{const.} = \begin{cases} 0.0007 & (\text{Flaming Kerosene and Polyurethane}) \\ 0 & (\text{Smoldering Cotton}) \end{cases} \quad \text{式 5-5}$$

本実験では3種類の火源しか取り扱わなかったが、式 5-4 が他の火源でも成立するならば、式 5-6 を用いて容易に他の火源での煙の付着係数を求めることが可能である。

$$\eta = \frac{\zeta}{\int C_s dt} = \frac{\left(1 - \frac{a \tau}{0 \tau}\right)}{\int C_s dt} = \frac{\left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right)}{\int C_s dt} \quad \text{式 5-6}$$

式中の記号はいずれも付着対象材料における初期透過率 ${}_0\tau$  ( $0 < {}_0\tau \leq 1$ )、煙粒子が付着した後の透過率 ${}_a\tau$  ( ${}_a\tau \leq {}_0\tau$ )、付着前の透過輝度 $L_1$ [cd/m<sup>2</sup>]、付着後の透過輝度 $L_2$ [cd/m<sup>2</sup>]である。

## 5-5. まとめ

本章では、煙に暴露された時間とその煙の光学的濃度から、煙粒子の付着量を予測するモデルを構築した。

$$\zeta = \eta \int C_s dt, \quad \eta = \text{const.} = \begin{cases} 0.0007 & (\text{Flaming Kerosene and Polyurethane}) \\ 0 & (\text{Smoldering Cotton}) \end{cases}$$

このモデルでは代表的な火源3種類（綿灯芯、灯油、ポリウレタン）について付着係数を求めており、さらに光源や避難誘導灯に一般的に使用される2種類の材料（ガラスとアクリル）について付着現象に差異がないことを確認しているので、くん焼燃焼や有炎燃焼時の煙粒子の付着とそれに伴う光源輝度等の減衰を予測できると考える。

## 参考文献：

- 1) Yuki AKIZUKI, Takeyoshi TANAKA, Hidekazu SUZUKI and Tsuneto TSUCHIHASHI : Calculation Method for Visibility of Emergency Sign in Fire taking into account of Smoke Adhesion, Fire Safety Science - Proceedings of the 8th International Symposium, pp.1093-1105, 2005

- 2) 秋月有紀・田中哮義：火災時の煙流動に伴う視野輝度分布の予測, 照明学会誌, Vol.90, No.4, pp.209-214、2006
- 3) Yuki AKIZUKI and Takeyoshi TANAKA : Visibility of Text Information Functioning as Urban Disaster Prevention: The Visibility of Emergency Signs in the Daegu Subway Fire, Korea、Proceedings of 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology、pp.579-590、2004
- 4) Hidekazu SUZUKI, Yuki AKIZUKI and Takeyoshi TANAKA : Study on the Visibility of Emergency Sign in Fire Smoke: Part 2 Calculation Model for Luminance Distribution in Fire at a Smoke Filling Stage, Proceedings of 5th Lux Pacifica、pp.47-52、2005
- 5) 神忠久：煙中の誘導標識の身透し距離について(I)、日本建築学論文報告集、No.182、pp.21-29、1971
- 6) 田中哮義：改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、2002
- 7) Chandrasekhar S.: Radiative Transfer, New York, Dover, 1960
- 8) Jun-ichi WATANABE, Takeyoshi TANAKA: Prediction of Ceiling Jet Smoke Concentration under Two Layer Environment, Fire Science and Technology, Vol. 24, No. 3, pp.151-164, 2005
- 9) 渡邊純一他：火災感知器動作予測のための天井熱煙流解析法、松下電工技報 No.79、pp.46-53、2002





## 第6章 煙粒子の付着を考慮した火災煙下の視対象輝度予測

### 6-1. はじめに

煙中における光源や標識の視認距離の算出モデルは松浦ら<sup>1)2)</sup>により提案されているが、火災煙の特徴である煙粒子の付着現象については対応していない。

そこで本章では、前章で構築した火災煙に暴露された空間の物体表面に対する煙粒子の付着量予測式を用いて、煙粒子の付着を考慮した視対象輝度の計算モデルを示す<sup>3)4)</sup>。またそれを用いて煙粒子の付着を考慮した避難者視野輝度分布の表現を試みる<sup>5)</sup>。さらに2003年2月に発生した韓国大邱地下鉄火災における車両内サインの視認性について評価する<sup>6)</sup>。

### 6-2. 煙粒子の付着を考慮した火災煙下の視対象輝度の予測式

#### 6-2-1. 煙粒子の散乱特性の取り扱い

散乱媒質中における光の透過の基礎式については、火災煙下での視認性研究だけでなく霧中での（道路照明計画に関連する）視認性研究や大気中のMie/Rayleigh散乱特性の研究などでも検討されている課題である<sup>7)~15)</sup>。

大気中で生じる散乱には、図6-1に示すように散乱を生じさせる物質の大きさの違いによって指向性を持つか否かが異なる。粒子径が非常に小さい場合は光が全方向等しく散乱（等方性散乱）し、空気分子程度の大きさになると指向性のRayleigh散乱が生じる。さらに粒子径が大きくなるにつれて前方散乱が強くなり、特定の方向への散乱が相対的に強く表れるMie散乱を生じる<sup>16)</sup>。

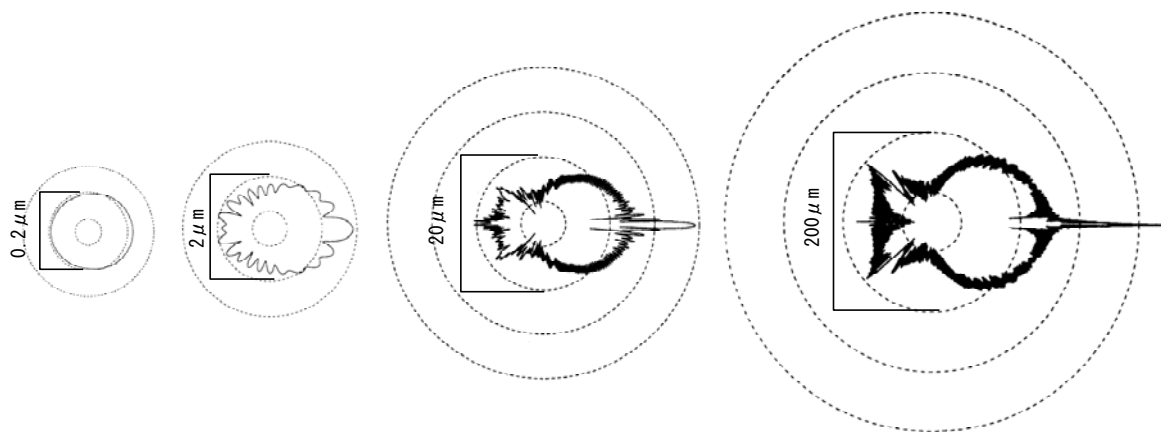


図 6-1 粒子の大きさの違いによる散乱パターンの差異<sup>16)</sup>

（水滴・波長 550nm の可視光線照射・位相関数を対数で表示）

神<sup>17)</sup>はくん焼煙粒子と有炎燃焼煙粒子の径を光学顕微鏡で測定し、くん焼煙時は直径0.5～1.5 $\mu\text{m}$ の球形粒子を、また有炎燃焼煙時は1.0～20 $\mu\text{m}$ の不定形粒子を形成していることを明らかにした。この粒子径から判断すると、くん焼煙時は等方性散乱からRayleigh散乱を生じ、有炎燃焼時はMie散乱を生じると考えられる。さらに神は同じ論

文<sup>17)</sup>の中で、光散乱光度計を用いてヒマラヤスギのくん焼煙（白煙）と有炎燃焼煙（黒煙）の散乱光強度の角度分布を求めたが、そこでは共にMie散乱であることが示されており（図 6-2）、粒子径に基づく散乱パターンと矛盾が生じている。さらに神は論文中<sup>17)</sup>において、有炎燃焼煙では火源種類や空気供給量により散乱状態がかなり影響されることを言及している。すなわち、火災時に発生する空気汚染物質は等方性散乱からMie散乱まで火災状況に応じて変化しており、またその空気汚染物質は煤のような大きなものから微小な水滴まで様々なものが混在しているため、不安定な状態であることを意味している。

本研究では、二層ゾーンモデルによる煙性状予測値を用いて、火災煙中の視対象輝度変化を簡易に把握することを目的としている。そこで最も取り扱いが容易な等方性散乱を前提として、既往の透過式を応用しながら基礎式を構築する。

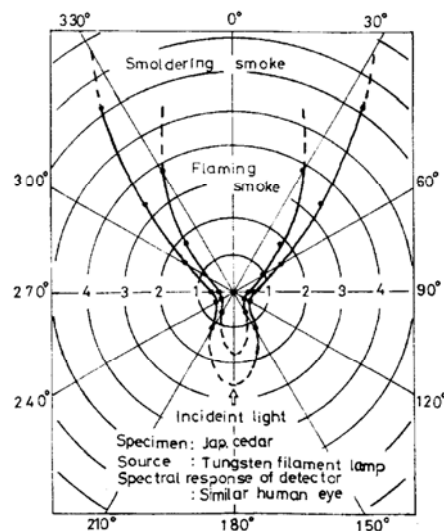


図 6-2 散乱光強度の角度分布（ヒマラヤスギ・くん焼煙および有炎燃焼煙）<sup>17)</sup>

## 6-2-2. 散乱媒質中における松浦の光の透過基礎式<sup>1)</sup>

吸収・散乱・放射をする媒質中の放射伝達の基礎式はS.Chandrasekharによって、 $(\theta, \phi)$  方向に沿った長さ  $ds$ 、底面積  $dA$  の筒状物体内のエネルギー収支から導かれ、式 6-1 で表されている<sup>17) 注 1)</sup>。

$$\frac{dI}{ds} = -(K_a + K_s)I + K_a I_b(T) + \frac{K_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} P(\theta, \phi; \theta', \phi') I(\theta', \phi') d\omega' \quad \text{式 6-1}$$

式の右辺第一項は吸収成分、第二項は温度放射成分、第三項は散乱成分を表している。式中の  $I$  は、空間（表面上を含む）のある点の  $(\theta, \phi)$  方向の放射束の、その方向に垂直な面に対する面密度・立体角密度（放射輝度） $[\text{kcal}/\text{hm}^2\text{sr}]$  であり、 $K_a$  は吸収係数、 $K_s$  は散乱係数であり、 $K_a + K_s$  は消散係数すなわち光学的煙濃度  $C_s$  である。また  $I_b(T)$  は温度  $T$  の黒体の放射輝度  $[\text{kcal}/\text{hm}^2\text{sr}]$ 、 $P(\theta, \phi; \theta', \phi')$  は散乱関数、 $(\theta', \phi')$  は入射光の方位角、 $(\theta, \phi)$  の散乱の方位角であり、式 6-2 の関係を満足する。なおこの時の  $d\omega$  は  $(\theta', \phi')$  の方向の微小立体角を示している。

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi : \theta', \varphi') d\omega' = 1 \quad \text{式 6-2}$$

式 6-1 を光に適用する場合は右辺第二項の温度放射を考慮する必要がなく、また右辺第一項は光の吸収（消散）、第三項は光の散乱による増分を表すと考えられる。松浦<sup>1)</sup>は  $I$  の代わりに輝度  $L$  を用い、図 6-3 中の  $s$  地点の  $(\theta, \phi)$  方向の輝度を  $L(s; \theta, \phi)$  として式 6-1 に代入し、まず式 6-3 を示した。図 6-2 に概念図を示す。式中の  $k$  は減光係数（光学的煙濃度）における散乱成分アルベド<sup>注2)</sup>であり、式 6-4 の関係がある。

$$\frac{dL(s; \theta, \varphi)}{ds} = -C_s L(s; \theta, \varphi) + \frac{kC_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi : \theta_s, \varphi_s) L(s; \theta_s, \varphi_s) d\omega_s \quad \text{式 6-3}$$

$$k = \frac{K_s}{K_a + K_s} = \frac{K_s}{C_s} \quad \text{式 6-4}$$

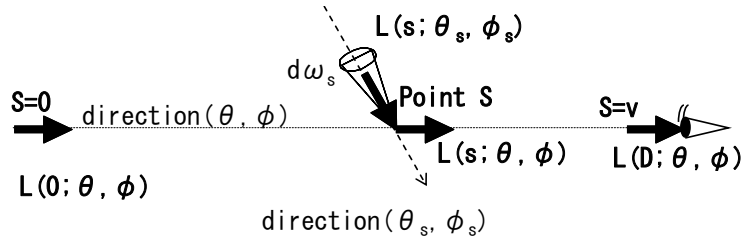


図 6-3 任意の  $s$  地点での輝度  $L(s; \theta, \phi)$  の概念図<sup>1)</sup>

この式 6-3 について  $s=0 \sim v$  で積分すると、 $v$  地点における  $L(v; \theta, \varphi)$  は式 6-5 で表される。この式の右辺第一項は輝度  $L(0; \theta, \varphi)$  が  $v$  地点まで到達するまでに煙によって減光した輝度を示しており、第二項は  $0$  から  $v$  までの任意の  $s$  地点における散乱による輝度の総和を示している。

$$L(v; \theta, \varphi) = L(0; \theta, \varphi) e^{-C_s v} + \int_0^v k C_s \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi : \theta_s, \varphi_s) L(s; \theta_s, \varphi_s) \frac{d\omega_s}{4\pi} e^{-C_s(v-s)} ds \quad \text{式 6-5}$$

なお  $s$  地点での全方向へ散乱する輝度の総和を式 6-6 で示す。任意の  $s$  地点の散乱輝度も当然それぞれの位置において距離減衰するものとして処理して、 $0$  から  $v$  まで積分した全散乱輝度  $L(K_s)$  を求める式 6-7 は、数式的でなく物理現象から予測された式であるが、式 6-6 を代入して解くと式 6-5 の右辺第二項を求めることができる。

$$f(K_s) = k C_s \int_0^{4\pi} P(\theta, \varphi : \theta_s, \varphi_s) L(s; \theta_s, \varphi_s) \frac{d\omega_s}{4\pi} \quad \text{式 6-6}$$

$$L(K_s) = \int_0^v f(K_s) e^{-C_s(v-s)} ds \quad \text{式 6-7}$$

本研究では煙粒子が等方性散乱を生じるものと仮定しており、その場合、散乱関数  $P(\theta, \varphi : \theta_s, \varphi_s) = 1$  であるから、式 6-5 は式 6-8 に変換される。

$$L(v; \theta, \varphi) = L(0; \theta, \varphi) e^{-C_s v} + \int_0^v k C_s \int_0^{4\pi} L(s; \theta_s, \varphi_s) \frac{d\omega_s}{4\pi} e^{-C_s(v-s)} ds \quad \text{式 6-8}$$

前述式 6-2 を式 6-8 に代入すると、最終的に散乱媒質中の光の透過基礎式は式 6-9 の形をとる。

$$L(v; \theta, \phi) = L(0; \theta, \phi) e^{-C_s v} + k L(s; \theta_s, \phi_s) (1 - e^{-C_s v}) \quad \text{式 6-9}$$

内部に散乱媒質を有した閉空間の光透過基礎式 の概念図を図 6-4 に示す。この図を元に各部位で生じている光の伝達について個々に述べる。

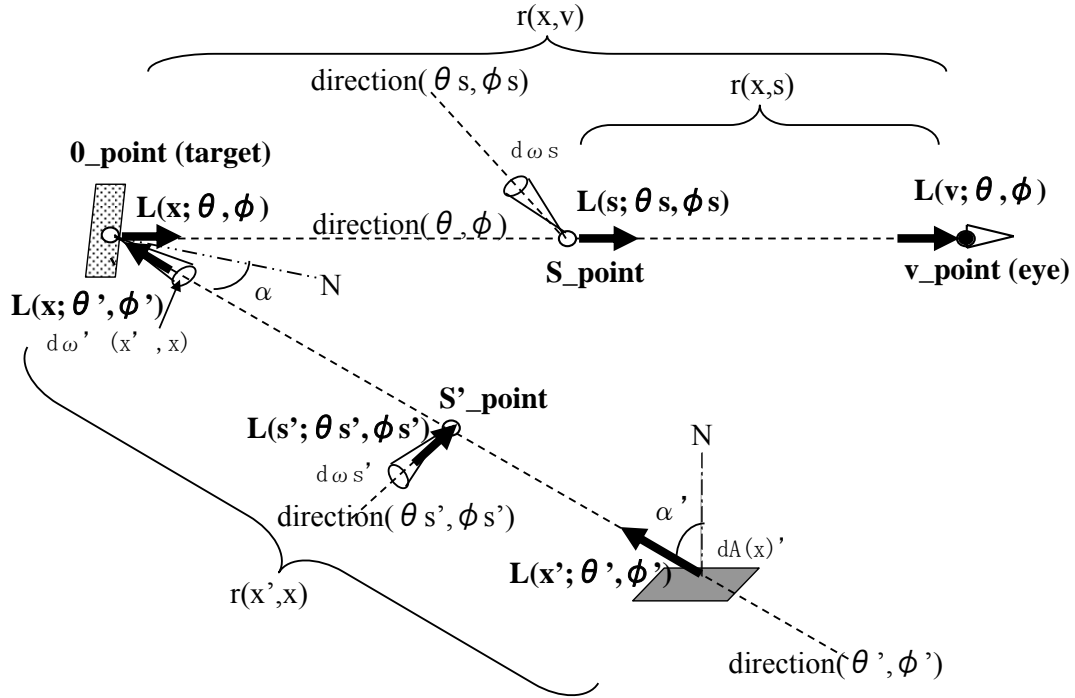


図 6-4 閉空間の光透過基礎式 の概念図<sup>1)</sup>

閉空間の標識上の任意の点を $x$ 、閉空間内部の任意の点（眼の位置）を $v$ とし、 $xv$ 方向を $(\theta, \phi)$ 、 $xv$  2 点間の距離を $r(x, v)$ で表すと、眼に届く輝度 $L(v; \theta, \phi)$ （前述式 6-5）は式 6-10 のように表される。但しこの段階では、散乱関数 $P(\theta, \phi; \theta_s, \phi_s)$ は場所により異なる一般的表現を用いている。右辺第一項は標識上 $x$ 点での輝度が距離減衰することを、第二項は標識から眼までの距離における媒質の散乱輝度の総和を意味する。

$$L(v; \theta, \phi) = L(x; \theta, \phi) e^{-C_s r(x, v)} + \int_0^{r(x, v)} k C_s \int_0^{4\pi} P(s; \theta, \phi; \theta_s, \phi_s) L(s; \theta_s, \phi_s) \frac{d\omega_s}{4\pi} e^{-C_s r(s, v)} dr(s, v) \quad \text{式 6-10}$$

式 6-10 の右辺第一項の中の $L(x; \theta, \phi)$ は、その面で直接発光する輝度 $L_d(x; \theta, \phi)$ と、周囲からの光が $x$ 点で反射するものの和で表され式 6-11 のようになる。なお $\alpha$ は周囲光が $x$ 点に入射する角度を示し、 $\beta(\theta', \phi'; \theta, \phi)$ は体積に対して定義される散乱関数の概念を面積に対して適用して面の反射指向特性を表した輝度率<sup>19)20)</sup>である。

$$L(x; \theta, \phi) = L_d(x; \theta, \phi) + \int_0^{2\pi} \beta(x; \theta', \phi'; \theta, \phi) L(x; \theta', \phi') \frac{\cos \alpha d\omega'(x', x)}{\pi} \quad \text{式 6-11}$$

式 6-11 の右辺第二項の中にある閉空間壁面の反射輝度  $L(x;\theta',\varphi')$  は、式 6-10 を用いて、式 6-12 のようになる。また式 6-11 の右辺第二項の  $\frac{\cos \alpha d\omega'(x',x)}{\pi}$  は、式 6-13 のように展開されて  $dF(x',x)$  に置き換える。最終的に式 6-11 は式 6-14 で表される。

$$L(x;\theta',\varphi') = L(x';\theta',\varphi')e^{-C_s r(x',x)} + \int_0^{r(x',x)} kC_s \int_0^{4\pi} P(s';\theta',\varphi':\theta_s',\varphi_s') L(s';\theta_s',\varphi_s') \frac{d\omega_s'}{4\pi} e^{-C_s r(s',x)} dr(s',x) \quad \text{式 6-12}$$

$$\frac{\cos \alpha d\omega'(x',x)}{\pi} = \frac{\cos \alpha \cos \alpha' dA(x')}{\pi \{r(x',x)\}^2} = dF(x',x) \quad \text{式 6-13}$$

$$L(x;\theta,\varphi) = L_d(x;\theta,\varphi) + \int_0^A \beta(x';\theta',\varphi':\theta,\varphi) L(x';\theta',\varphi') e^{-C_s r(x',x)} dF(x',x) \\ + \int_0^A \beta(x';\theta',\varphi':\theta,\varphi) \int_0^{r(x',x)} kC_s \int_0^{4\pi} P(s';\theta',\varphi':\theta_s',\varphi_s') L(s';\theta_s',\varphi_s') \frac{d\omega_s'}{4\pi} e^{-C_s r(s',x)} dr(s',x) dF(x',x) \quad \text{式 6-14}$$

すなわち、閉空間の内表面の相互反射を考慮した光の透過基礎式は、式 6-10 と式 6-14 の非線形連立積分方程式により表されるが、非常に複雑で実用的ではないため、松浦はこの式の近似化についても段階を踏まえながら言及している。

#### ①壁面の反射光輝度が一定の場合

式 6-14 の右辺第二項と右辺第三項は壁面の反射光輝度を表しているが、壁面の反射光輝度が一定  $L_i$  の場合、式 6-14 は式 6-15 のように表され、式 6-10 に代入すると基礎式の近似は式 6-16 のようになる。なお、式 6-16 の右辺第一項は  $x$  点で直接発光する輝度が、また第二項は  $x$  点における周囲からの反射光輝度が距離減衰することを表し、第三項は標識から眼までの距離における媒質の散乱輝度の総和を表している。

$$L(x;\theta,\varphi) = L_d(x;\theta,\varphi) + L_i \quad \text{式 6-15}$$

$$L(v;\theta,\varphi) = L_d(x;\theta,\varphi) e^{-C_s r(x,v)} + L_i e^{-C_s r(x,v)} + \int_0^{r(x,v)} kC_s \int_0^{4\pi} P(s;\theta,\varphi:\theta_s,\varphi_s) L(s;\theta_s,\varphi_s) \frac{d\omega_s}{4\pi} e^{-C_s r(s,v)} dr(s,v) \quad \text{式 6-16}$$

#### ②壁面の反射光輝度が一定で、かつ媒質の二次散乱による輝度分布が一定の場合

壁面の反射光輝度が一定  $L_i$  で、かつ媒質の二次散乱（媒質間で交わされる二回以上の散乱）による輝度分布が一定  $L_s$  の場合（ $L_s$  は壁面からの減衰も含む）、式 6-16 の右辺第三項の中の  $L(s;\theta_s,\varphi_s)$  は式 6-17 で表され、これを式 6-16 に代入すると、式 6-18 が導き出される。

$$L(s;\theta_s,\varphi_s) = L_d(x'';\theta_s,\varphi_s) e^{-C_s r(x'',s)} + L_s \quad \text{式 6-17}$$

$$L(v; \theta, \varphi) = L_d(x; \theta, \varphi) e^{-C_s r(x, v)} + L_i e^{-C_s r(x, v)} + k L_s (1 - e^{-C_s r(x, v)}) \\ + \int_0^{r(x, v)} k C_s \int_0^{4\pi} P(s; \theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s) L_d(x''; \theta_s, \varphi_s) e^{-C_s r(x'', v)} \frac{d\omega_s}{4\pi} e^{-C_s r(s, v)} dr(s, v) \quad \text{式 6-18}$$

なお、くん焼煙のように吸収がない場合は、減光係数における散乱成分  $k=1$  とおくことができ、この場合、 $L_i=L_s$  と見なすことができる。すなわち式 6-18 は式 6-19 に再表現される。

$$L(v; \theta, \varphi) = L_d(x; \theta, \varphi) e^{-C_s r(x, v)} + L_i \\ + \int_0^{r(x, v)} k C_s \int_0^{4\pi} P(s; \theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s) L_d(x''; \theta_s, \varphi_s) e^{-C_s r(x'', v)} \frac{d\omega_s}{4\pi} e^{-C_s r(s, v)} dr(s, v) \quad \text{式 6-19}$$

### ③壁面の反射光輝度が一定で、かつ媒質の輝度分布が一定の場合

壁面の反射光輝度が一定  $L_i$  で、かつ媒質の輝度分布が一定  $L_c$  の場合、式 6-16 は次式 6-20 のような単純な形をとる。式 6-16 と同様、式 6-20 の右辺第一項は  $x$  点で直接発光する輝度が、また第二項は  $x$  点における周囲からの反射光輝度が距離減衰することを表し、第三項は標識から眼までの距離における媒質の散乱輝度の総和を表している。火災煙の標識の視認距離について検討した神<sup>17)</sup>もこの式と同様の式を導いている。

$$L(v; \theta, \varphi) = L_d(x; \theta, \varphi) e^{-C_s r(x, v)} + L_i e^{-C_s r(x, v)} + k L_c (1 - e^{-C_s r(x, v)}) \quad \text{式 6-20}$$

なお前出と同様、くん焼煙のように吸収がない場合は  $k=1$  で  $L_i=L_c$  と考えられるので、式 20 は式 21 にまとめられる。

$$L(v; \theta, \varphi) = L_d(x; \theta, \varphi) e^{-C_s r(x, v)} + L_i \quad \text{式 6-21}$$

なお松浦は  $L_i$  について、完全拡散する光束  $F_m[\text{lm}]$  の光源が空間にあり、光源面積に対して室表面積  $A_m[\text{m}^2]$  が非常に大きい場合に、室の平均反射率  $\rho_m$  を用いて式 6-22 で計算できることを示している。

$$L_i = \frac{F_m \cdot \rho_m}{\pi \cdot A_m} \quad \text{式 6-22}$$

くん焼煙は火災の初期と末期に生じる煙であるが、盛期火災時の炎を上げている状況においては黒っぽい有炎燃焼煙を発生するので、式 6-18 もしくは式 6-20 を基本とする。

### 6-2-3. 煙粒子の付着を考慮した視対象輝度予測式<sup>3)4)</sup>

前項で引用した、Chandrasekhar の放射伝達式<sup>18)</sup>を応用した松浦の光透過基礎式<sup>1)</sup>では、煙の光学的濃度における散乱成分  $k$  を変数として残した状態で、式 6-20 まで近似化することができている。さらに、くん焼煙のように吸収がない白煙の場合は  $k=1$  かつ  $L_i=L_c$  と処理してより簡便な式 6-21 に展開している。なお有炎燃焼時は黒煙を発するため煙粒子には吸収成分があり、神は実験より  $k=0.5 \sim 1$  であることを示した<sup>17)</sup>。

二層ゾーンモデルで取り扱う煙層にこのような吸収成分を含む煙粒子が一様な状態で存在している場合、特に有炎燃焼時の黒煙においては、天井に存在する光源の光束が煙層を透過して空気層および床面に到達する直接成分に対して、煙層の粒子等に反射して形成される散乱成分は非常に小さい値となる。さらに火災現象ではエネルギーの移動が活発であり、それは周囲の熱環境や区画を形成する材料などの影響を受けて変動するため、完全に定常状態になるものではなく、煙流動シミュレーションにおいて予測値と実測値の誤差は1割程度発生するものと捉えられている。つまり、松浦の光透過基礎式において区別されて取り扱われた壁面反射光輝度 $L_i$ と媒質の輝度分布 $L_e$ は、厳密に区別せず同じ値 $L_{smoke}$ にまとめて取り扱っても、大局に影響しないと考える。

そこで本研究では、煙層にある任意の位置での視対象輝度が観察者の眼前まで到達する近似基礎式を式 6-23 として提案する。 $L_D[cd/m^2]$ は、煙の光学的濃度 $C_s[1/m]$ が一様な環境で観察者から距離 $D[m]$ 離れた視対象輝度が減衰しながら観察者の眼に到達した直接成分（右辺第一項）と、この光路にわたる煙粒子の散乱輝度の積分（間接成分、右辺第二項）から構成されている。 $L_{smoke}[cd/m^2]$ は煙粒子に入射し、位置や方向にかかわらず均等散乱する輝度を意味している。この近似基礎式は図 6-5 に示すような一般的な内照式誘導標識の形状を考慮して、右辺に光源輝度 $L_e[cd/m^2]$ と標識パネル部の透過率 $\tau_e$ 及び表面反射率 $\rho_e$ を設定しているが、反射型標識のように発光していない視対象の場合にも適応可能である。なお透過率と表面反射率の左添え字 $a$ は煙の付着を表している。式中の $k$ は光学的濃度における散乱成分を示し、火災初期及び末期のくん焼燃焼に見られる白煙は 1.0、盛期火災時の有炎燃焼に見られる黒煙は 0.5 とする<sup>16)</sup>。

$$L_D = ({}_a\tau_e L_e + {}_a\rho_e L_{smoke})e^{-C_s D} + L_{smoke}k(1 - e^{-C_s D}) \quad \text{式6-23}$$

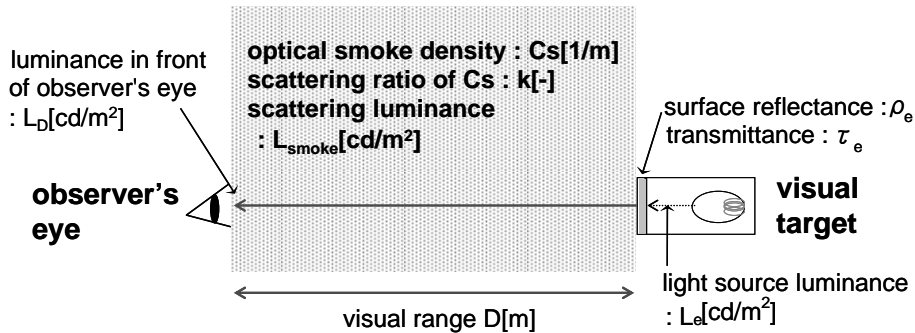


図 6-5 煙中の視対象輝度の近似基礎式の各要素

煙付着後の誘導標識や光源等の透過率 ${}_a\tau_e$ は、付着前の初期透過率 $\tau_e$ 、光学的濃度 $C_s[1/m]$ とその暴露時間 $t[s]$ 、煙の付着による減衰率 $\zeta$ および付着係数 $\eta$ を用いて式 6-24で示す。

$${}_a\tau_e = \tau_e(1 - \zeta) = \tau_e \left(1 - \int \eta C_s dt\right) \quad \text{式6-24}$$

煙が付着した火災室壁面や誘導標識表面等の反射率 $\rho_{el}$ は、壁面等の初期反射率 $\rho_e$ と煙粒子の反射率 $\rho_{smoke}$ を用いて式6-25で表される。

$$\rho_{el} = \rho_{smoke} \zeta + \rho_e (1 - \zeta) = \rho_e - \int \eta C_s dt (\rho_e - \rho_{smoke}) \quad \text{式 6-25}$$

なお、 $L_{smoke}[\text{cd/m}^2]$ は光源面積が室の表面積よりも非常に小さい場合、松浦の光透過基礎式での $L$ 算出式（式 6-22）を適用する。

#### 6-2-4. 予測式の検証

前項で提案した、煙粒子の付着を考慮した視対象輝度予測式（式 6-23）について、実験結果と比較を行い検証する。

##### 6-2-4-1. 実験概要

壁面反射率 0.038 で照明のない暗室実験室（W7.5×D10.0×H4.0[m]）の中央に、高さ 1.35m の発光型視対象を設置し、発光部（直径 0.14[m]の円）中央に対して、 $(\theta, \phi) =$  正対 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(75^\circ, 0^\circ)$ 、 $(45^\circ, 30^\circ)$ の位置に輝度計(Konica Minolta LS-110)を置いて、2種類の煙について光学的濃度変化に伴う発光面輝度を測光した。発光型視対象と輝度計の距離はいずれも 1[m]である。さらに発光部中央から正対して 1[m]離れた位置およびその床面に照度計を設置した。実験室における装置配置概要を図 6-6 に示す。

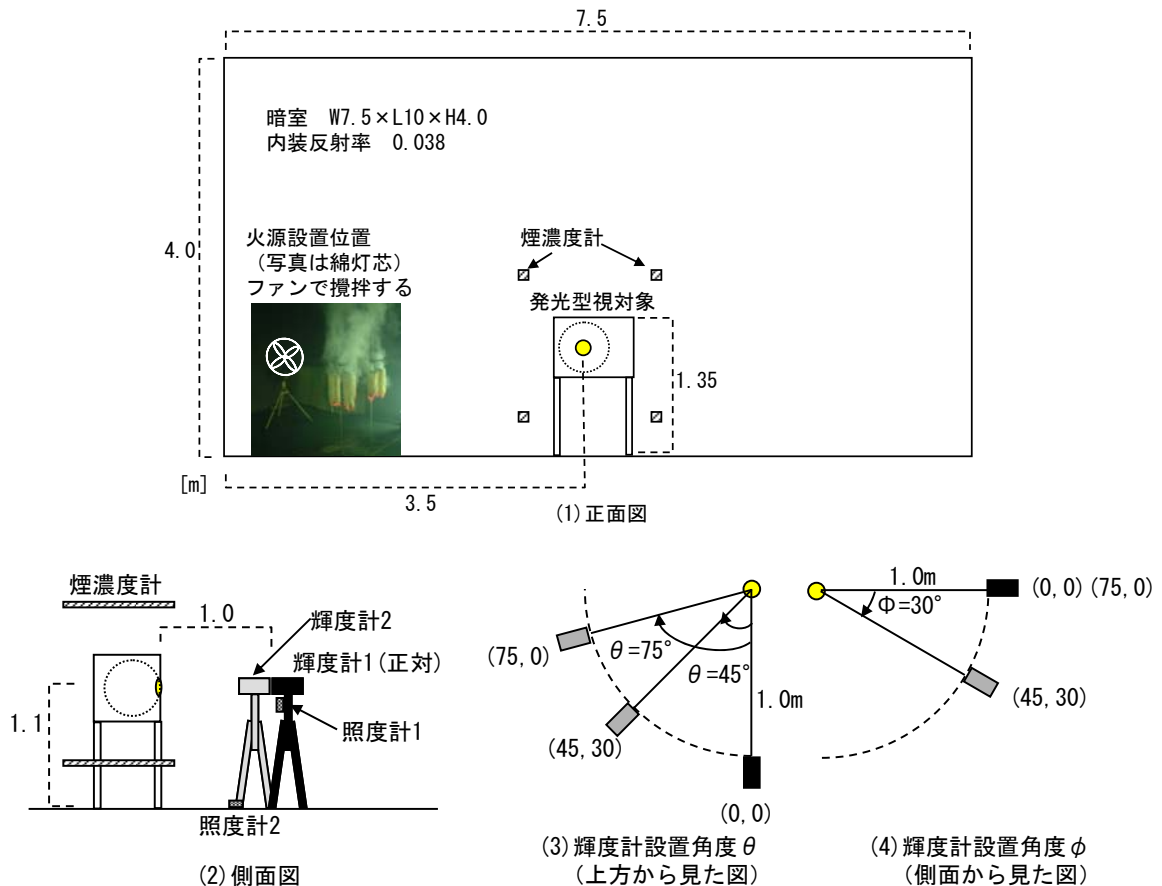


図 6-6 実験室における装置配置概要



発光型視対象の光源は 100[W]1500[lm]の白熱灯であり、白熱灯から発する光を直径 0.5[m]の積分球で完全拡散させた後に、開口した発光面から光を出力する。

煙は発煙筒による黒煙（Koa-Kako SL-135B、主成分は六塩化エタン、アントラセンと被膜マグネシウム）と綿灯芯による白煙を用い、それぞれの煙で光学的煙濃度  $C_s$  値が最大になるまで室内を煙で充満させ、その後ゆるやかに排気を行って  $C_s$  値がほぼ 0 になるまでの測光量を連続計測した。なお、煙が暗室内に十分充満するまでは確認のため暗室の照明を点灯させており、ピークに達した段階で全消灯した。

室内の  $C_s$  値がほぼ均一になるように、室内の空気は常時扇風機によって攪拌されている。 $C_s$  値は視対象の周辺上下左右 4 箇所配置した煙濃度計によって計測し、濃度が均一に分布していることを常時確認しており、最終的に  $C_s$  値は 4 カ所の煙濃度計の平均値を代表値として取り扱う。

#### 6-2-4-2. 測光量と光学的煙濃度の経時変動

図 6-7 および図 6-8 に、黒煙および白煙における測光量と光学的濃度の経時変動の結果を示す。発煙筒による黒煙は短時間で暗室内に充満され  $C_s$  値も最大 4.35 と高いが、綿灯芯による白煙は充満するまで時間を要し  $C_s$  値も最大 1.88 と低い。ゆっくりと排煙し  $C_s$  値が低下するのに伴い発光部輝度は増加する傾向は、黒煙・白煙ともに同様である。しかし発光面に正対した鉛直面照度と床水平面照度では、黒煙の場合  $C_s$  値が低下するのに伴い照度値は増加するが、一方白煙の場合  $C_s$  値が変化しても照度値は殆ど変化しておらず散乱の影響が見られる。

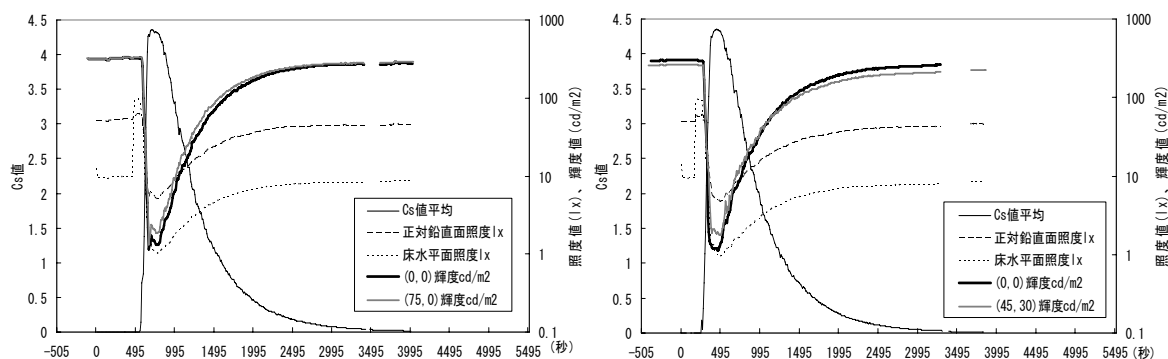


図 6-7 黒煙における測光量と光学的煙濃度の経時変動

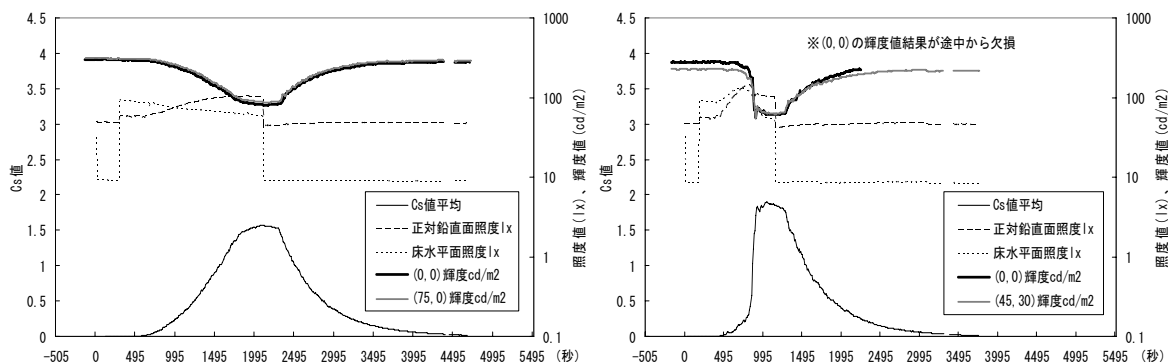


図 6-8 白煙における測光量と光学的煙濃度の経時変動

### 6-2-4-3. 光学的煙濃度における散乱成分 k の検証

煙の光学的濃度が室内で均一である場合、煙によって発光型視対象の光が散乱した光量は正対させた位置の照度（正対鉛直面照度）と床水平面照度で把握できる。光学的濃度と照度の関係を図 6-9 に示す。白煙では、Cs値が増加しても煙のない状態（Cs=0）の照度と殆ど変わらず一定値を示しており、Csは散乱成分のみから構成されていると考えることができる（ $\therefore k=1.0$ ）。一方、黒煙の照度は  $\log_e E_{black} = a \times Cs + b$  の直線回帰式に基づいており、回帰式の傾きはほぼ 0.5 で半分の光量が吸収されていることを意味していると考えられる（ $\therefore k=0.5$ ）。また、正対鉛直面照度の方が床水平面照度と比べて照度値が大きいが、光学的濃度と照度の相対的な関係は等しく、k値も等しい。なおこの結果は既往研究<sup>16)</sup>と等しいことが示された。

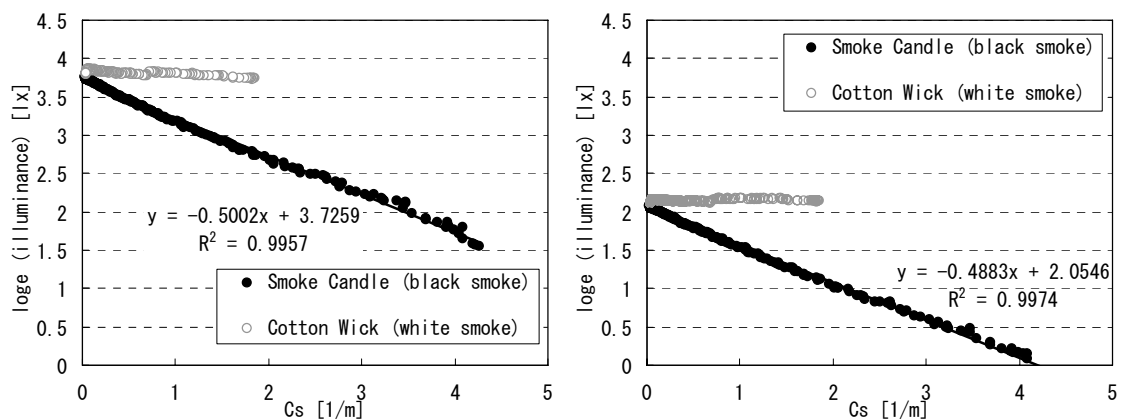


図 6-9 白煙における測光量と光学的煙濃度の経時変動（左：正対鉛直面照度、右：床水平面照度）

### 6-2-4-4. 測定角度による違い

正対位置(0° ,0° )の輝度と同じ時に測定した(75° ,0° )もしくは(45° ,30° )の位置の輝度を比較し、図 6-10 に示す。黒煙の結果では、(75° ,0° )の結果が  $Cs > 2$  から、(45° ,30° )の結果が  $Cs > 3$  から、正対位置の輝度と違いが見られるが大きな差異はなく、測定角度による違いを考慮する必要はないと考えられる。白煙の結果では光学的濃度が  $Cs < 2$  と低い条件でのみ測定されており、測定角度の違いは見られず正対位置とそれ以外の位置の結果はいずれも一致している。すなわち、本章で等方性散乱を前提に設定したことに對して、問題はないと考えることができる。

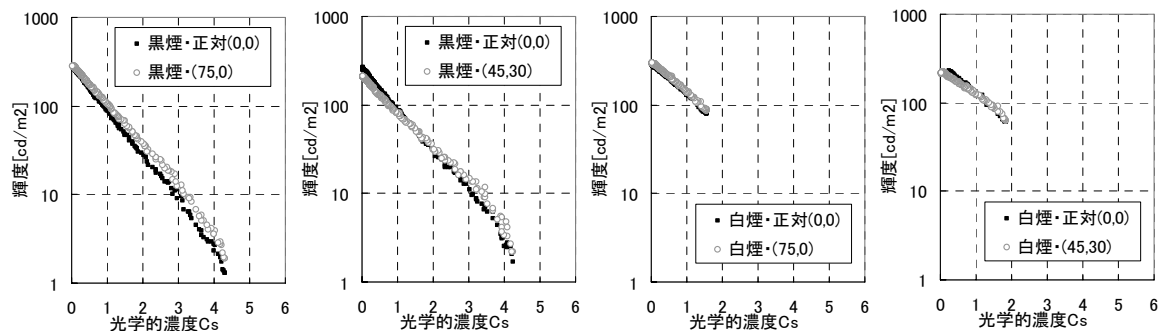


図 6-10 測定角度による違い（左：黒煙、右：白煙）

#### 6-2-4-5. 発煙筒の付着係数

本実験で白煙用に用いた光源は綿灯芯であり付着係数  $\eta=0$  を第 5 章で求めている。

黒煙用の火源として利用したのは発煙筒であり、第 5 章の煙粒子の付着において検討に用いた火源（灯油およびポリウレタン）と異なる。そこで輝度計のレンズに粒子が付着する現象を用いて今回の発煙筒粒子の付着係数  $\eta$  を求める。なお実験が終了する毎にレンズは清掃している。表 6-1 に実験開始直後（開始 0 秒時）の光源の初期輝度  $L_1[\text{cd/m}^2]$ ・実験終了時の輝度  $L_2[\text{cd/m}^2]$ ・煙粒子の付着による輝度減衰  $\zeta$ ・実験総時間  $[s]$ ・実験総時間における  $\int C_s dt[\text{s/m}]$ ・各測定点での付着係数  $\eta[\text{m/s}]$  およびその平均値を示す。これらは前出図 6-7 の結果に基づき抽出したが、同時刻に別の地点で測定した 2 結果も含めた。付着係数  $\eta$  は前章式 5-2 と式 5-4 から成る式 6-26 を用いて計算した。最終的に発煙筒の付着係数  $\eta=0.000036$  を得た。

$$\eta = \frac{\zeta}{\int C_s dt} = \frac{(1 - L_2/L_1)}{\int C_s dt} \quad \text{式 6-26}$$

表 6-1 発煙筒の付着係数の計算

	第一測定（図6-7左）			第二測定（図6-7右）		
	正対(0, 0)	(75, 0)	A地点	正対(0, 0)	(45, 30)	B地点
初期輝度 ( $=L_1$ ) $[\text{cd/m}^2]$	313.444	316.162	290.318	299.333	261.605	169.316
実験終了後の輝度 ( $=L_2$ ) $[\text{cd/m}^2]$	271.333	279.174	271.522	259.833	212.451	156.324
$\zeta (=1-L_2/L_1)$	0.13434952	0.11699066	0.06474472	0.13195991	0.18789488	0.07673226
実験総時刻 $[s]$	3405			3285		
実験総時間での $\int C_s dt [\text{s/m}]$	3214.823			3301.882		
$\eta (= \zeta / \int C_s dt) [\text{m/s}]$	0.000042	0.000036	0.000020	0.000040	0.000057	0.000023
$\eta$ データの平均値	0.000036					

#### 6-2-4-6. 付着を考慮した視対象輝度予測式の検証

付着を考慮した視対象輝度予測式の検証は次の過程を経て行う。

本実験では輝度計レンズに付着現象が生じるが、発光型視対象は積分球の開口発光面であり、付着は生じず透過率  $\tau_e=1$  かつ反射率  $\rho_e=0$  である（積分球の内部および光源設置位置には煙粒子が入らないよう処置している）。そこで前出式 6-23 から式 6-25 を今回の実験条件に適用するように式 6-27 の形に変更した。

$$L_D = \left(1 - \eta \int C_s dt\right) L_e e^{-C_s D} + L_{smoke} k \left(1 - e^{-C_s D}\right) \quad \text{式6-27}$$

式 6-27 にある距離  $D$  は発光型視対象と輝度計の距離 1.0[m] であり、光学的濃度における散乱成分  $k$  は前項 6-2-4-3 より黒煙の時 0.5、白煙の時 1.0 を代入する。また付着係数  $\eta$  は前項 6-2-4-5 より黒煙の時 0.000036、白煙の時 0 を代入する。室内の光源は発光型視対象のみであり、 $L_{smoke}[\text{cd/m}^2]$  は実験環境条件を代入して式 6-28 で求めた。

$$L_{smoke} = \frac{1500 \times 0.038}{\pi \times \{(7.5 + 10) \times 4 \times 2 + 7.5 \times 10 \times 2\}} = 0.0626 \quad \text{式 6-28}$$

以上、式 6-27 と式 6-28 から計算される予測値と、実際の測定された実験値の関係を図 6-11 に示す。黒煙（左図）と白煙（右図）共に、発光型視対象と輝度計が正対する ( $0^\circ, 0^\circ$ ) について 2 回測定した結果を用いる。図の横軸は実験値、縦軸は予測値で共に常用対数で示してある。図中の直線は  $y=x$ （実験値=予測値）を表しており、凡例にはその相関係数を示してある。

図より黒煙の結果では、高輝度部分では実験値と予測値がほぼ一致しているが、光学的濃度が高くなり低輝度部分になると実験値よりも予測値が高くなる傾向が見られる。白煙の結果でも、やはり高輝度部分では両者がほぼ一致しているが、光学的濃度が高くなり低輝度部分になると実験値よりも予測値が低くなる傾向が見られる。

このように、煙の付着を考慮した視野輝度予測式は光学的濃度が高い条件では誤差が大きくなる傾向が見られる。しかし全体的にはいずれの結果も非常に相関係数は高く、火災時の視認性の予測に十分適用可能と考えられる。

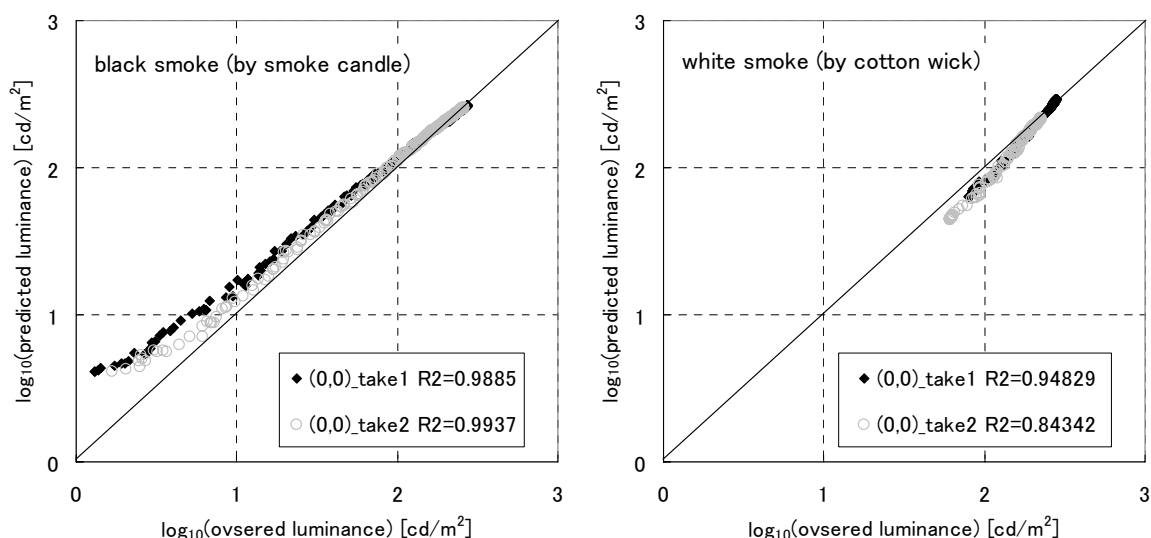


図 6-11 煙の付着を考慮した視対象輝度予測式の精度（左：黒煙、右：白煙）

### 6-3. 二層ゾーンモデルによる煙性状の把握<sup>21)22)23)</sup>

二層ゾーンモデル<sup>21)</sup>は、区画された火災室内を上部煙層と下部空気層の水平な二層に分離して取扱い、火源の燃焼に伴う火災室内の各物質の質量保存式、エネルギー保存式および気体の状態方程式を用いて、各層内の平均温度  $T$  [K] や煙層下端高さ  $Z_{air}$  [m]、生成される各化学種濃度、その位置のプリューム流量  $m_p(Z_{air})$  [kg/s] などを求めることができる。二層ゾーンモデルの研究は多数存在するが、本研究では視野輝度予測に関わる煙層内の光学的濃度  $C_s$  [1/m] と煙層厚み  $(H-Z_{air})$  [m] が必要であるため、渡邊らが開発した単室二層ゾーンモデル<sup>22)23)</sup>の式 6-29～式 6-34 を引用する。

$$C_s = P_{smoke} \phi_s \quad \text{式 6-29}$$

$$\frac{dZ_{air}}{dt} = \frac{Q_c - Q_w + C_p T_{air} m_p(Z_{air})}{C_p T_{smoke} P_{smoke} A} \quad \text{式6-30}$$

$$\frac{dT_{smoke}}{dt} = \frac{Q_c - Q_w - C_p (T_{smoke} - T_{air}) m_p(Z_{air})}{C_p P_{smoke} (H - Z_{air}) A} \quad \text{式6-31}$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{\gamma_s m_b - \phi_s m_p(Z_{air})}{P_{smoke} (H - Z_{air}) A} \quad \text{式6-32}$$

$$P_{smoke} = 353 / T_{smoke} \quad \text{式6-33}$$

$$m_p(Z) = 0.08 Q_c^{1/3} Z_{air}^{5/3} \quad \text{式6-34}$$

右下添字の $smoke$ 又は $air$ はそれぞれ煙層又は空気層内に存在する要素であることを示す。 $H$ は室天井高さ[m]、 $A$ は室床面積[m<sup>2</sup>]、 $Q_c$ は火源から発生してプルームに持ち込まれる熱量[kW]、 $Q_w$ は煙層から熱伝達で壁や天井へ移動する熱量[kW]、 $C_p$ は気体の定圧比熱 [kJ/kgK]、 $P$ は気体の平均密度 [kg/ m<sup>3</sup>]、 $\phi_s$ は煙層の平均吸収断面積 [m<sup>2</sup>/s]、 $\gamma_s$ は燃料の単位重量当りに発生する吸収断面積[m<sup>2</sup>/kg]、 $m_b$ は燃料の質量減少速度 [kg/s]を示す。

#### 6-4. 煙粒子の付着を考慮した避難者視野輝度分布の表現<sup>5)</sup>

火災時における避難者の視野の輝度分布は、初期輝度分布に対して時々刻々と変化する煙性状とそれに伴う各点での輝度変化を算出することで表現することが可能である。そこで本項では、火災室の煙層の変動を二層ゾーンモデルBRI2002<sup>24)</sup>で予測した上で、室内に想定した避難誘導標識を含む輝度分布がどのように変化するか検討した事例を示す。

##### 6-4-1. 想定条件

大きさ W15.0×D15.0×H3.5[m]で、内装反射率は天井 0.8・壁 0.6・床 0.5 の、一般的な事務所空間で火災が発生したことを想定する。概要を図 6-12 に示す。

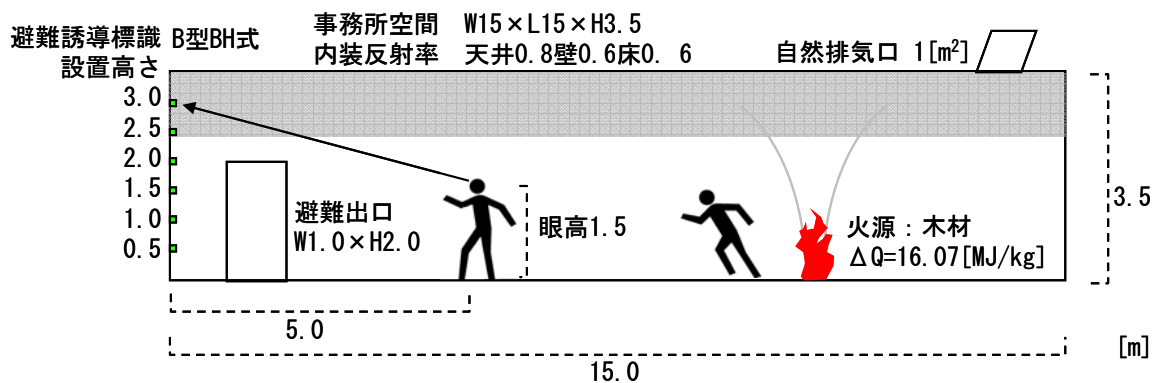


図 6-12 想定条件の概要

火災時には天井に設置されている照明は全て消灯するが、ある壁面の中央に鉛直方向 0.5m 間隔で床面からの高さ 0.5~3.0[m] まで 6 台の避難誘導標識を設置し、それらは火災時点灯していることとする。避難誘導標識の高さを変えて 6 台設置したのは、煙の降下に伴う視野輝度分布の変化を分かり易く表現するためである。使用する避難誘導標識は B 級 BH 型（縦 211×横 612[mm]）で光源輝度 600[cd/m<sup>2</sup>]・光束 150[lm]（130 形冷陰極蛍光灯 2 灯）とした。

火源は木材とし、単位燃料あたりの発熱速度は 16070[kJ/kg]、火災成長率  $\alpha=0.0125$  で、発熱速度は式 6-35 で設定する。

$$Q_c = \max(\alpha t^2, 100) \quad \text{式6-35}$$

木材が有炎燃焼することにより黒煙を発するが、その燃料の単位重量当りに発生する吸収断面積  $\gamma_s$  は 210[m<sup>2</sup>/kg]<sup>21)</sup>とする。但し、付着係数  $\eta$  は第 5 章において火源として木材を取り扱っていなかったため、黒煙の代表として灯油の付着係数  $\eta=0.0007[\text{m/s}]$  を用いる。また煙粒子の反射率は  $\rho_{\text{smoke}}=0.1$  とする。

被験者は、避難誘導標識を設置した壁面に向かい合う位置で、壁から 5.0[m] 離れて立ち、目の高さは 1.5[m] とする。

煙制御の効果を表現するため、次の 2 種類の排煙条件の異なるケースを設定した。

Case1 : W1.0×H2.0[m] のドアと 1.0[m<sup>2</sup>] の自然排気口で排煙する

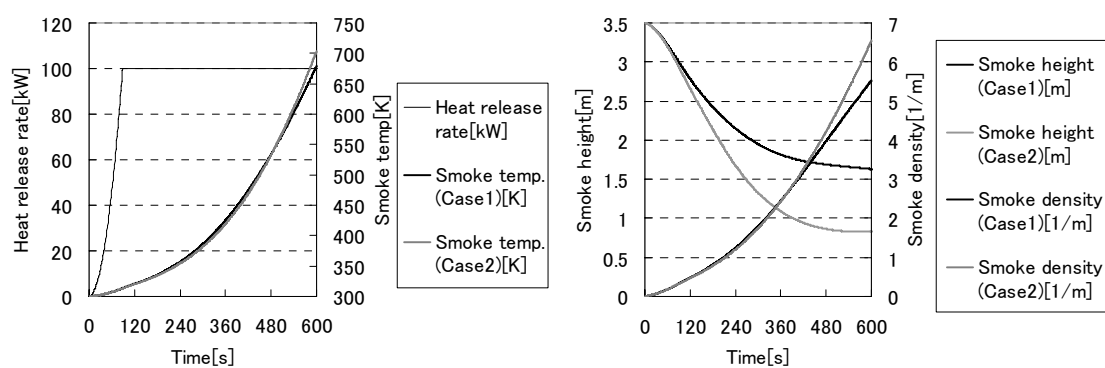
Case2 : ドアのみ開放されており、自然排気口は設置されていない

Case1 は排煙が上手く機能している例で、Case2 は自然排気口がなく空気の流れはドアのみで行うといった、排気設計が十分行われていない例を想定している。

視界の設定は、一般的なハイビジョン画像のアスペクト比 9:16 を参考に設定する。これは人間が顔を動かさずに眼球運動のみで見ることの出来る範囲で鉛直方向約 90° 水平方向約 120° に該当する。この視界を縦 18 分割・横 32 分割のメッシュに分割し、その中心位置の座標を用いた。

## 6-4-2. 火災の状況

図 6-13 に発熱速度・煙層温度・煙層高さ・光学的煙濃度について示す。火源が燃焼するにつれて煙層の温度が上昇し、煙の光学的濃度が増加する。また煙層高さ（煙層と下部空気層の境界高さ）は燃焼と共に降下する。2 種類のケースにより結果が異なり、煙層温度はケースの違いが極僅かであるが、煙層高さは両者の差が顕著である。Case1 では煙層高さが 1.5[m] より低くならないのに比べ、Case2 では着火後約 360[s] に煙層高さが 1.0[m] に到達しており、避難困難である状況であると推測できる。



(1) 発熱速度と煙層温度

(2) 煙層高さや煙の光学的濃度

図 6-13 火災の状況

### 6-4-3. 避難者の視野輝度分布

図 6-14 に避難誘導標識の輝度変化を示す。Case1 では煙層高さが 1.5[m]まで降下しないので、それより下の避難誘導灯の輝度は初期値から変化しないが、それ以上の位置にある避難誘導灯の輝度は時間が経つにつれて低下する。Case2 では全ての避難誘導標識の輝度が時間と共に低下する。約 260[s]に煙層が 1.5[m]の高さ（眼の高さ）に到達し、その位置の避難誘導標識は急激に輝度が低下する。またCase 2 において、高さ 2.0[m]以上の避難誘導標識が約 20[cd/m<sup>2</sup>]まで低下する時間はCase1 よりも速い。

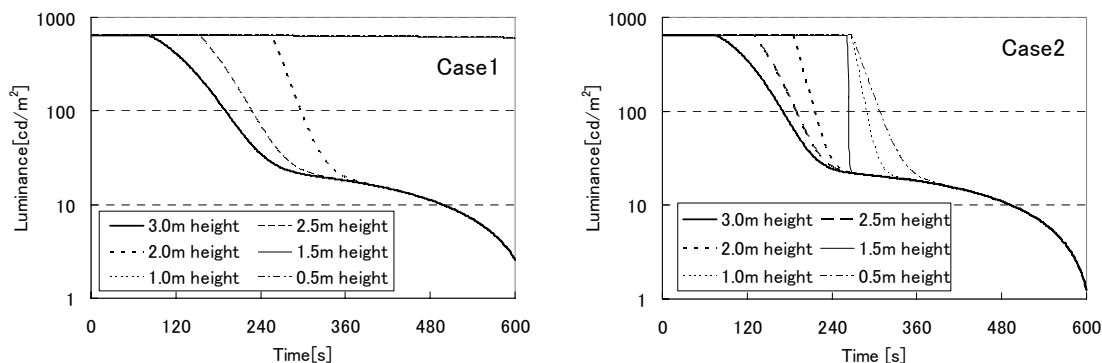


図 6-14 避難誘導標識の輝度変化（左：Case1、右：Case2）

図 6-15 は今回のケーススタディにおける視野輝度分布の変化を可視化した例である。排煙が十分でない Case 2 では時間の経過と共に煙層高さが下降し、火源が燃焼するにつれて輝度分布も同時に変化して正面壁に設置された避難誘導標識が煙にのまれていく様子がわかる。また Case 2 よりも排煙が適している Case1 でも、火災 300 秒後での煙層高さが 1.9[m]に達しており、避難者が避難不能とされている 1.8[m]よりも高い状態に煙を維持できている状態だが、それより高い位置に設置された避難誘導標識は煙層に覆われ視認できなくなり、避難者は避難経路を見失うことを意味している。このことは、長い廊下の場合に、上方だけでなく壁面や床面などの下方にも避難誘導標識を設置するか、若しくは設置間隔を短くする必要があることを表している。なお、現在、建築基準法の階避難安全検証(ルートB)において、避難上支障がある煙層高さは床面から 1.8[m]

に設定されているが、避難誘導灯を下方に設置していない空間においては、それより高い位置に設置された避難誘導灯が識別できなくなることを反映させ、1.8[m]よりも高い位置で避難不能状態になることを考える必要がある。

今回は検討した想定空間は、壁面の反射率が簡易で且つ閉空間内に正面壁以外に別の光源が存在しないといった単純なものであり、実用化に向けて様々な追加検討が必要であるが、煙粒子の付着を考慮した避難者視野輝度分布の初めての試みである。

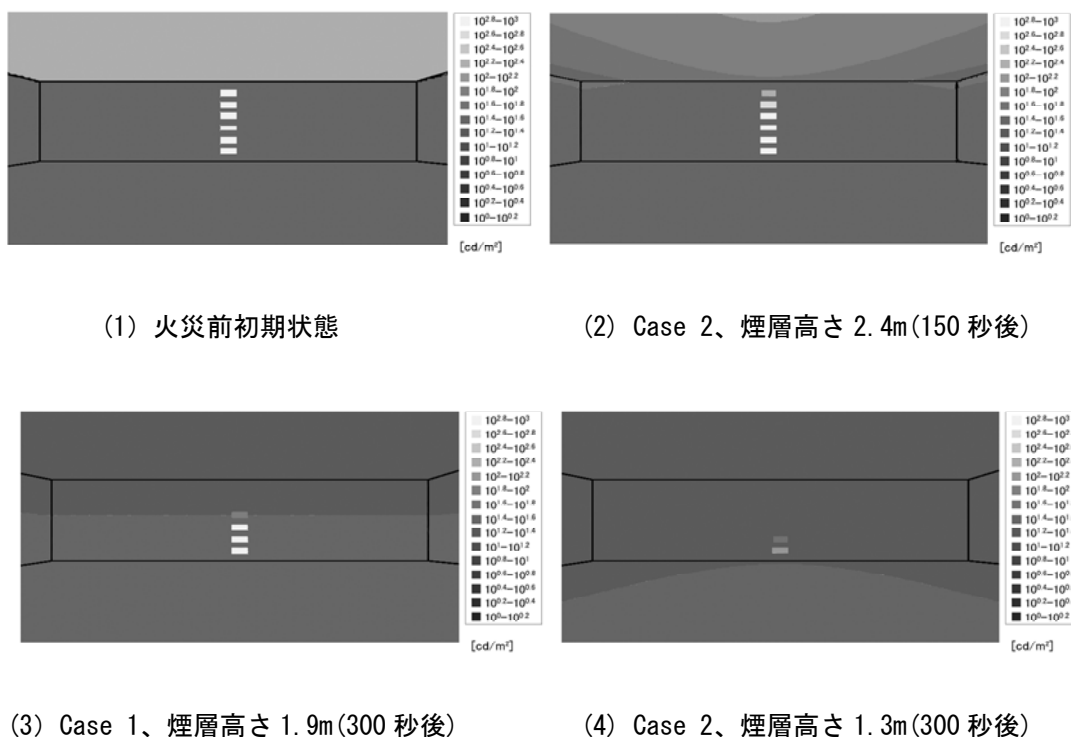


図 6-15 避難者の視野輝度分布

#### 6-4-4. 避難誘導標識の初期輝度継続時間の比較

前出図 6-14 の結果を元に、避難誘導標識の初期輝度 600[cd/m<sup>2</sup>]及び最低必要とされる輝度 100[cd/m<sup>2</sup>]がどの程度維持されるか検討し図 6-16 に示す。いずれも初期輝度に

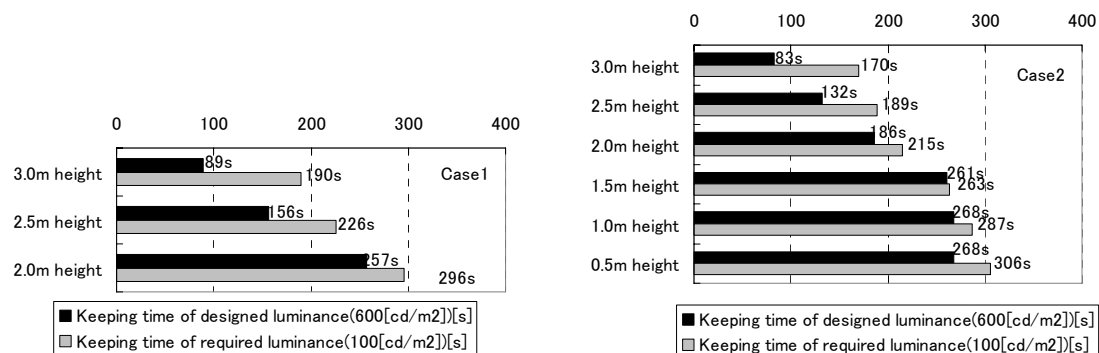


図 6-16 避難誘導標識の高さと初期輝度継続時間（左：Case1、右：Case2）



対して最低必要輝度の継続時間は長く、どの高さの避難誘導標識でも Case1 の方が Case2 よりも継続時間が長い。設置高さ 2.0[m]の避難誘導標識で見ると、Case1 では最低必要輝度が 296 秒間継続されるが、Case 2 では 215 秒間と短い。通常の避難経路において、避難誘導標識はドアより高い 2.0[m]以上に設置されるが、今回の結果は、高い位置に設置された避難誘導標識は火災煙により本来備えるべき輝度を長時間維持できないことが明らかになった。

#### 6-5. 大邱地下鉄火災における車両内サインの視認性<sup>6)</sup>

本項では、煙粒子の付着を考慮した視対象輝度の予測モデルを用いて、2003 年 2 月に発生した韓国大邱地下鉄火災における車両内サインの視認性について評価する。

##### 6-5-1. 大邱地下鉄火災の概要

韓国で三番目に大きい都市・大邱において 2003 年 2 月 18 日 09:53 に発生した地下鉄火災は、死者 198 名・負傷者 145 名という大災害であった。大邱地下鉄 1 号線の中央路駅地下 3 階のホームに停車中の車両 1079 号で約 2L のガソリンによる放火があり、焼損面積 2004[m<sup>2</sup>]（地下 3 階全焼）、熱損・汚損面積 8433[m<sup>2</sup>]の被害規模となった。死者の内、車両内で死亡したのは 142 人であったが、79 人は出火車両でなく反対車線の車両 1080 号の乗客であった。その原因は、1080 号の運転手と中央管制塔の判断のミスと言われており、運転手は乗客がまだ車両内にいるにも関わらず車両の全電源を OFF にしたため、多くの乗客が中に閉じこめられたことが直接の要因であった。

しかし一般に車両には電源が仮に OFF になっても、手動でドアの油圧を下げ、外に逃げることができる仕組みが備わっている。大邱地下鉄車両も同様であり、ドアの下部周辺にある非常用ドアレバーを用いれば、ドアが開いたのである。事実、閉じこめられた乗客の中の一人に鉄道関係者がいた車両では、彼が完全に停電になる前に予め非常用ドアレバーを引いていたため、手動でドアを開けることができ乗客たちは外に逃げることができた。火災直前の車両 1080 号での状況（図 6-17）<sup>25)</sup>によると、乗客は周囲の異常な事態を感じながらも落ち着いた状態で着席しており、車両内の照明も点灯していた。この非常用ドアレバーの開閉方法に関する説明は、一般の乗客のためにドア横に設置されていたが、見付けにくく文字も見難い状態であったため、殆どの乗客はその



図 6-17 火災現場（中央路駅舎）に入る直前の車両 1080 号の状況<sup>25)</sup>

存在すら気づきもしなかった。避難経路の確保に関する重要なサインであったが、視認性や誘目性が悪く適切なデザインでなかったため多くの死傷者を出したといえる。すなわち、避難経路の視環境が災害の軽減に重要であることを示した実例であった。

### 6-5-2. 非常用ドアレバーのサインの物理性状

大邱地下鉄火災後、首都ソウルを始めとする地下鉄において、駅舎や車両内部での大幅なサインデザインの見直しが行われた。火災後に暫く中央路駅は封鎖され、その駅を除く地下鉄路線駅間でピストン運動が行われており、2003年7月19日の現地調査時に、災害前後の非常用ドアレバーの視認性に関するサインの物理性状について測定した。

図 6-18 および図 6-19 は発災前後の非常用ドアレバーのサインの写真であり、表 6-2 および表 6-3 は文字寸法や輝度対比など、視認性に関するサインの物理性状を示す。文字の輝度対比はほぼ同程度だが、サイズの全寸や記載文字の寸法は大きく改善された。

表 6-2 発災前の非常用ドアレバーの物理性状

Center Height of Installation Position 1.65m  
Illuminance of Target Surface 450lx  
Size of Taret H 0.151m × W0.095m



		Headline	Description	Supplement
Number of characters		8	52	37
Character Size	Height	1.20	0.60	0.54
	Width	0.78	0.48	0.42
Reflectance	Character	0.468	0.103	0.103
	Background	0.208	0.468	0.468
Contrast		0.555	0.780	0.780
Color Combination(C/B)		White/Red	Black/White	Black/White

図 6-18 発災前の非常用ドアレバー

表 6-3 発災後の非常用ドアレバーの物理性状

Center Height of Installation Position 1.06m  
Illuminance of Target Surface 127lx  
Size of Taret H 0.217m × W0.283m



		Headline	Description	
Number of characters		10	52	6
Character Size	Height	3.60	2.13	2.13
	Width	2.36	1.61	1.61
Reflectance	Character	0.757	0.158	0.362
	Background	0.362	0.757	0.757
Contrast		0.522	0.791	0.522
Color Combination(C/B)		White/Red	Black/White	Red/White

図 6-19 発災後の非常用ドアレバー

### 6-5-3. 記載文字の視認距離

まず煙のない状態におけるサインの記載文字 $S'$  [m]の視認距離 $D$  [m]を求める（式 6-36）。算出方法は第 3 章 3-3-6 と同じ方法を用い、要求される読み易さの程度は $\alpha'=0.8$ とし、避難者は青年（視力 $VA=2.0$ 、眼高 $h=1.58$ [m]）と高齢者（ $VA=1.0$ 、 $h=1.49$ ）の 2 種類を設定した。記載文字の設置高さ $H$  [m]や輝度対比 $C$ は前項 6-5-2 の値を用い、背景輝度 $L_b$  [cd/m<sup>2</sup>]は前項 6-5-2 に示したサイン表面の鉛直面照度 $E$  [lx]を元にサイン背景部の反射率 $\rho_b$ から式 6-37 により換算した。概要を図 6-20 に示す。

$$D = \left[ \frac{\frac{S'}{2}}{\tan\left(\frac{30 \times 10^{0.75\alpha'} \times 120}{VA \times L_b^{0.23} \times C}\right)} + \sqrt{\left\{ \frac{\frac{S'}{2}}{\tan\left(\frac{30 \times 10^{0.75\alpha'} \times 120}{VA \times L_b^{0.23} \times C}\right)} \right\}^2 - 4(H-h)^2} \right] / 2 \quad \text{式 6-36}$$

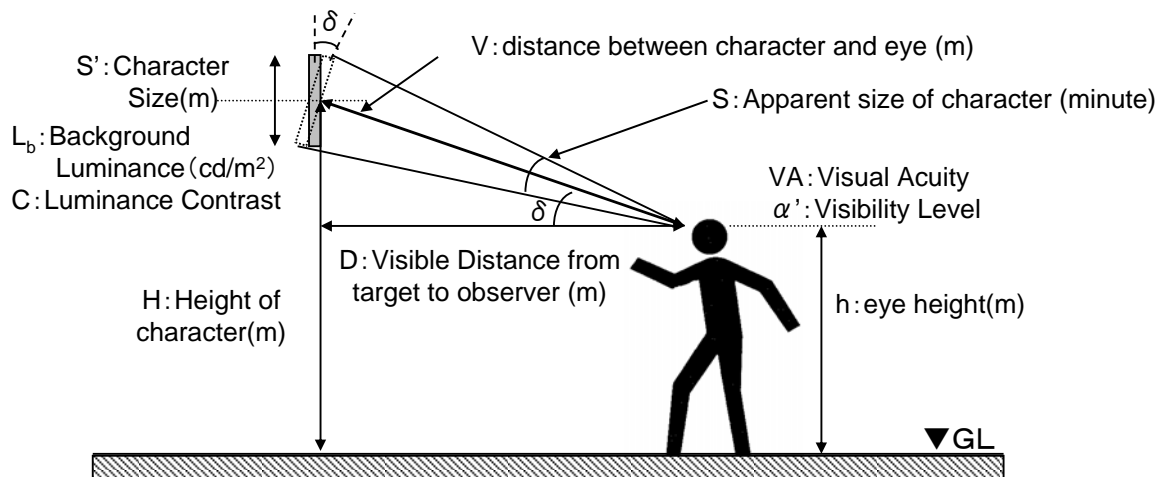


図 6-20 記載文字の視認距離算出の要素（図 3-31 と同様）

$$L_b = \frac{E\rho_b}{\pi} \quad \text{式 6-37}$$

発災前のサインの見出し文字は非常に小さいため視認距離は短く、煙のない初期状態において青年で 0.79[m]、高齢者で 0.29[m]である。特に高齢者については、日常の照明環境であってもサインの記載文字が読み難く、災害時のような悪環境では問題となることが示唆された。

煙の中では、光学的濃度  $C_s$  の増加に伴い、文字や背景の輝度および両者の輝度対比が変化する。そこで煙のない初期状態の視認距離を基準として、その距離から視覚刺激（眼の位置までの輝度・輝度対比）が  $C_s$  値の増加に伴いどのように変化するか計算する。なお当時の車両 1080 号の写真資料（前出図 6-17）より、車両に最初に入ってきた煙は白煙であったので、光学的濃度における散乱成分  $k=1.0$ ・付着係数  $\eta=0$  で計算する。また車両の寸法と光源は資料が入手できなかったため、日本の一般的な鉄道客車車両を参考に、 $L 3[m] \times W 20[m] \times H 2.8[m]$ 、 $3200[lm]$ の 40W 直管型蛍光灯 18 台とし、また平均反射率は側面と車両結合面に窓ガラスが貼られていることを考慮して 0.2 に設定した。結果を図 6-21 に示す。図より  $C_s$  値が増加するにつれて、背景部輝度と文字部輝度が共に減少し、その結果、文字と背景の輝度対比は低下することが示されている。

さらに考察を深めるため、 $C_s$  値の増加に対して、煙がない時と同じ読み易さ評価が得られるための必要文字寸法を計算し図 6-22 に示す。対象とした文字は見出し文字で

ある。図より  $C_s$  値の増加に伴い必要文字寸法も増加する。また煙のない初期状態の視認距離が高齢者より長かった青年において、必要文字寸法は  $C_s$  値の増加に伴い増加し、 $C_s=2.0$  のような濃い煙の場合は、元の文字寸法の約2倍の大きさが必要となる。また  $C_s$  値の増加に伴う必要文字寸法の変化率は青年の方が高齢者よりも大きい。これは初期状態の視認距離の長さが影響している。

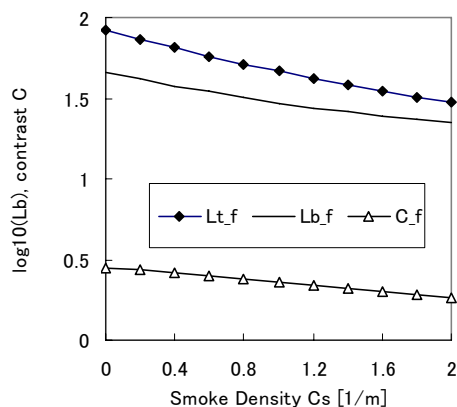


図 6-21 煙による視覚刺激の変化

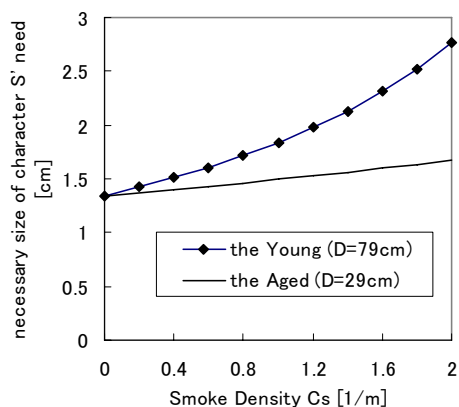


図 6-22 光学的煙濃度と必要文字寸法の関係

火災後に避難に関する全てのサインが大至急改善され、それは大邱に限らずソウルなどでも及んでいた。火災前には非常用ドアレバーのサインが設置されたドア周辺の乗客しか記載内容を読むことができなかったが、改善された後は、ドアから大きく離れた位置の乗客にも記載内容を読むことができるようになり、多くの乗客が避難する上で必要な情報が入手できるようになった。図 6-23 に発災前後での車両内部状況を示す（発災前の状態は、これまでの報道機関等からの情報を元に、発災後の写真画像を加工して作成した）。図より発災前に目立たなかった非常用ドアレバーのサインが追加されただけでなく、運転手との緊急連絡電話など災害時に必要な設備へのサインデザインも改良された。また当時火災事故の影響で車内広告の掲載が激減し、そのため必要なサインが直ぐに入手できる状況にもなっており、第 2 章で示した不要サインの撤去による避難経路探索し易さの向上が見られている。



(1) 発災前（加工処理有り）



(2) 発災後（2003/07/19 撮影）

図 6-23 発災前後の車両内部状況の比較

図 6-24 に発災前後のサインについて視認距離の範囲がどのように異なるかを比較する。改善されたサインの見出し文字の視認距離は以前のサインのそれよりも遙かに大きく、青年で 1.75[m]、高齢者で 0.57[m]であり、視認距離はサインデザインの改善により約 2 倍増加した。これは火災当時のサインの視認性がそもそも不十分であったことを表しているといえる。

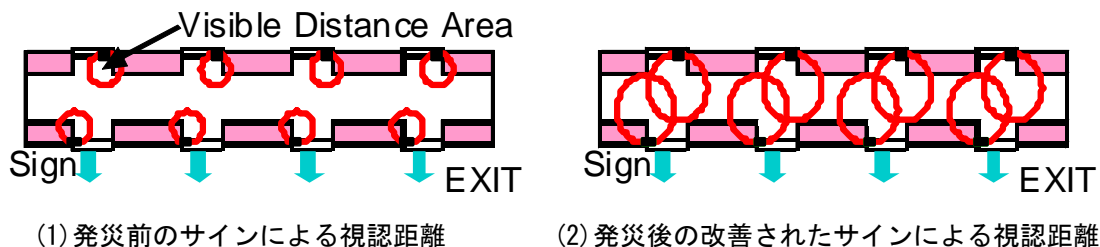


図 6-24 発災前後のサインデザインの違いによる視認距離の比較

サインデザインを改良することによる火災煙への有効性について示すため、図 6-16 に  $C_s$  値の増加に伴う必要文字寸法について、発災前後のサインでどのように異なるかを比較する。但し、前出図 6-22 に示されたように、煙のない初期状態の視認距離が大きいと光学的濃度の影響を強く受ける。そこで改善されたサインの観察距離を発災前のサインの初期状態での視認距離 0.79[m]（青年）に固定し、文字寸法以外の視覚刺激（背景輝度・視対象輝度・輝度対比）を用いて得られた必要文字寸法を図 6-25 に記述した。改善されたサインの実際の文字寸法は表 6-3 に示す通り 3.6[cm]である。その値が必要文字寸法となる場合の光学的濃度は図の矢印に示す 0.25[1/m]である。すなわち、改善されたサインは、光学的濃度 0.25[1/m]の煙の状態でも、古いサインの読み易さと同等の評価が得られると言える。このように、視認性の高いサインデザインを施すことで、火災時の避難に有効なサインにすることができ、避難経路の防災機能を高めることができることが示された。

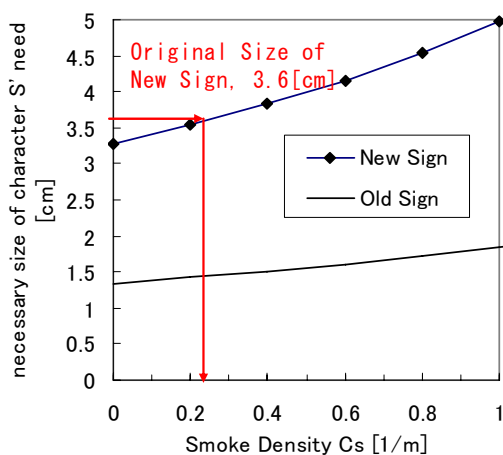


図 6-25 サインデザインの改良による火災時避難への有効性（視認距離 0.79[m]に換算）



## 6-6. まとめ

本章では、煙粒子の付着量予測式を用いて、視対象輝度の計算モデルを構築し、避難者の視野輝度分布を表現し、また実際の火災時でのサインの視認性について考察した。

第二項では、松浦の光透過基礎式に対して付着の影響を加味し、火災時の煙層における視対象輝度予測式を構築した。

$$L_D = (\tau_e L_e + \rho_e L_{smoke}) e^{-C_s D} + L_{smoke} k (1 - e^{-C_s D})$$

$$\tau_e = \tau_e (1 - \zeta) = \tau_e \left( 1 - \int \eta C_s dt \right)$$

$$\rho_e = \rho_{smoke} \zeta + \rho_e (1 - \zeta) = \rho_e - \int \eta C_s dt (\rho_e - \rho_{smoke})$$

$$L_{smoke} = F_m \rho_m / \pi A_m$$

式中の記号は、観察者の眼に到達する輝度 $L_D$ [cd/m<sup>2</sup>]、光源輝度 $L_e$ [cd/m<sup>2</sup>]、光学的煙濃度 $C_s$ [1/m]、観察者と視対象の距離 $D$ [m]、煙粒子付着前の標識パネル部の透過率 $\tau_e$ ・反射率 $\rho_e$ 、付着後の標識パネル部の透過率 $\tau_e$ ・反射率 $\rho_e$ 、光学的濃度における散乱成分 $k$ 、煙の暴露時間 $t$ [s]、煙の付着による減衰率 $\zeta$ および付着係数 $\eta$ 、煙粒子の反射率 $\rho_{smoke}$ 、煙層内の散乱輝度 $L_{smoke}$ [cd/m<sup>2</sup>]と光束 $F_m$ [lm]、煙層の表面積 $A_m$ [m<sup>2</sup>]と平均反射率 $\rho_m$ である。

また煙を充満させた実大空間において測光実験を行い、予測式が火災時の視認性の予測に妥当であることを確認した。

第三項で二層ゾーンモデルによる煙性状把握について既往知見を紹介した上で、第四項では避難者視野輝度分布の表現について、一般事務所の事例を用いて示した。そして高い位置に設置された避難誘導標識は煙層に覆われ視認できなくなり、避難者は避難経路を見失う状況があることを示唆し、避難経路が長い廊下の場合には、上方だけでなく壁面や床面などの下方にも避難誘導標識を設置するか、若しくは設置間隔を短くする必要があることを示した。

さらに第五項では、大邱地下鉄火災における車両内のサインの視認性について、車両からの避難として重要な機能を持っていた非常用ドアレバーのサインを取り上げ、発災前後でサインデザインが変更されたことにより、どの程度火災煙の中でも有効に視認できるようになるかを考察した。

本章でしめした知見により、煙の付着現象を考慮した上で、避難誘導灯やサインの視認性を明視三要素に基づいて評価することができる。また二層ゾーンモデルで把握する火災煙流動に応じた視認性予測モデルの構築にあたり有益なモデルであると考ええる。

注：

1) Chandrasekhar原著の49式  $-\frac{dI}{ds} \cdot \frac{1}{K_\rho} = I - \zeta$  を、松浦らに変更したと記述してあるが、

「振動数 $\nu$ に関する添え字を省略した」という説明文から考えても、引用式は 46

式  $\frac{dI_v}{ds} = -K_v \rho I_v + j_v \rho$  だったのではないかとと思われる。なお  $I_v$  は光度（点光源よりの単位立体角当たりの発散光束 [cd][lm/sr]）、 $K_v$  は質量吸収係数（一般に減光係数又は煙の光学的濃度といわれる  $C_s$  に相当する）、 $\rho$  は密度、 $ds$  は光の移動距離、 $j_v$  は放射係数である。また散乱媒体において入射角  $(\theta', \phi')$  と散乱角  $(\theta, \phi)$  の位相関数  $P(\theta, \phi; \theta', \phi')$  における散乱のみの放射係数は、散乱係数  $K_s$  を用いて下記式で表される。

$$\begin{aligned} j_v &= j_v^{(s)}(\vartheta, \varphi) \\ &= K_s \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} P(\vartheta, \varphi; \vartheta', \varphi') I_v(\vartheta', \varphi') \sin \vartheta' d\vartheta' d\varphi' \\ &= K_s \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} P(\vartheta, \varphi; \vartheta', \varphi') I_v(\vartheta', \varphi') d\omega' \end{aligned}$$

- 2) アルベド albedo とは太陽から降り注いだ光を地球がどれだけ反射するかの割合（反射能）のことで、大気の温度を決める要素の一つである。雪面や砂漠などは太陽光をよく反射するためアルベドが大きく、植物が植わっている場所は葉の表面から水分が蒸発するときに周りの大気から気化熱を奪うのでアルベドは小さくなる。アルベドの大きい方が地表面の温度上昇に与える影響は少ない。

#### 参考文献：

- 1) 松浦邦男・中村泰人：室内散乱媒質中における光の透過の基礎式（その1）、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.37-40、1971
- 2) 松浦邦男・中村泰人・細田泰彦：室内散乱媒質中における光の透過の基礎式（その2）、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.41-44、1971
- 3) Yuki AKIZUKI, Takeyoshi TANAKA, Hidekazu SUZUKI and Tsuneto TSUCHIHASHI : Calculation Method for Visibility of Emergency Sign in Fire taking into account of Smoke Adhesion, Fire Safety Science - Proceedings of the 8th International Symposium、pp.1093-1105、2005
- 4) 秋月有紀・田中哮義：火災時の煙流動に伴う視野輝度分布の予測、照明学会誌, Vol.90, No.4, pp.209-214、2006
- 5) Hidekazu SUZUKI, Yuki AKIZUKI and Takeyoshi TANAKA : Study on the Visibility of Emergency Sign in Fire Smoke: Part 2 Calculation Model for Luminance Distribution in Fire at a Smoke Filling Stage, Proceedings of 5th Lux Pacifica、pp.47-52、2005
- 6) Yuki AKIZUKI and Takeyoshi TANAKA : Visibility of Text Information Functioning as Urban Disaster Prevention: The Visibility of Emergency Signs in the Daegu Subway Fire, Korea, Proceedings of 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology、pp.579-590、2004

- 7) Shundeish Mahadev, Ronald C. Henry : Application of a Color-Appearance Model to Vision through Atmospheric Haze、Color research and application、Vol.24、No.2、pp.112-120、1999
- 8) Domina Eberle Spencer : Scattering Function for Fogs、Journal of the Optical Society of America、Vol.50、No.6、pp.584-585、1960
- 9) Ralph G. Eldridge, John C. Johnson : Distribution of irradiance in haze and fogs、Journal of the Optical Society of America、Vol.52、No.7、pp.787-796、1962
- 10) Rudolf Penndorf : Angular Mie Scattering、Journal of the Optical Society of America、Vol.52、No.4、pp.402-408、1962
- 11) Rudolf Penndorf : Approximation Formula for Forward Scattering、Journal of the Optical Society of America、Vol.52、No.7、pp.797-799、1962
- 12) Victor Twersky : Multiple Scattering of Waves and Optical Phenomena、Journal of the Optical Society of America、Vol.52、No.7、pp.145-171、1962
- 13) J.R. Hodgkinson, I. Greenleaves : Computation of Light-Scattering and Extinction by Spheres According to Diffraction and Geometrical Optics, and Some Comparisons with the Mie Theory、Journal of the Optical Society of America、Vol.53、No.5、pp.577-588、1963
- 14) 伊藤克三、柏原富江 : 拡散透過光に関する実験、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.49-52、1968
- 15) 伊藤克三、柏原富江 : 微粒子透過光の性状について、日本建築学会近畿支部研究報告集、p13-16、1969
- 16) 柴田清孝 : 応用気象学シリーズ 1 光の気象学、朝倉書店、1999
- 17) 神忠久 : 煙中の誘導標識の身越し距離について(I)、日本建築学論文報告集、No.182、pp.21-29、1971
- 18) Chandrasekhar S. : Radiative Transfer, New York, Dover, 1960
- 19) CIE Publication No.17.4 : International Lighting Vocabulary、1987
- 20) JCIE 翻訳出版 No.8 : 日本語版国際照明用語集第 4 版、1989
- 21) 田中哮義 : 改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、2002
- 22) Jun-ichi WATANABE, Takeyoshi TANAKA : Prediction of Ceiling Jet Smoke Concentration under Two Layer Environment, Fire Science and Technology, Vol. 24, No. 3, pp.151-164, 2005
- 23) 渡邊純一他 : 火災感知器動作予測のための天井熱煙流解析法、松下電工技報 No.79、pp.46-53、2002
- 24) 社団法人建築研究振興協会 : BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム、2003
- 25) 東亜日報 : 火災直前 の瞬間、2003/02/19 22:41 記事、<http://japan.donga.com/srv/service.php3?biid=2003022070008> (accessed 2011-12-09)



## 第7章 火災時避難経路の床面照度簡易計算法

### 7-1. はじめに

火災時の避難計画を検討する際、煙の伝搬とそれに伴う避難経路の視認性低下を把握することが重要であり、避難経路の明るさが煙と共にどのように減少していくかシミュレーションする必要がある。前出第四章では、避難経路の明るさの指標を床面照度に設定した場合に、その環境下での視力に基づいて歩行速度や心理状態を予測するモデルを構築した。このモデルを避難安全対策の性能的な検証方法へ適用するためには、火災発生後における建物内の室・通路部の床面照度の予測が不可欠である。

そこで本章では、火災安全設計において建物内の煙流動予測に広く用いられている二層ゾーンモデルを用いて得られる煙の特性値（煙層の高さ・光学的濃度）を利用することを前提として、既往の逐点法および作業面切断法<sup>1)</sup>を応用して火災時の避難経路の床面照度を簡易計算する方法について述べる。

### 7-2. 作業面切断法を適用した床面照度簡易計算モデルの構造

#### 7-2-1. 本研究における作業面切断法適用の妥当性

煙の無い通常の照明環境において、間接照度を簡易計算する手法の一つとして、作業面切断法が松浦によって提案されている<sup>1)</sup>。これは室内の相互反射を考慮する場合に、実際の床面は机などの存在によって相互反射に寄与することが少ないと考え、机等の上面を含む作業面をこれと等価な反射率を有する完全拡散性の面に置き換えて室内の相互反射を考えるとというものである<sup>2)</sup>。

松浦は想定する室内空間を、机等の配置が整然とした側窓を有する学校や事務室として、側窓の日射遮蔽条件などを変化させた作業面間接照度を検討し、作業面切断法の有効性を検討した<sup>3)~6)</sup>。側窓を光源とした設定条件は、作業面切断法による間接照度の簡易計算の精度を最も困難な条件について確認する目的があり、例えば奥行き・幅が長い室形状の場合は、光束伝達法による計算結果に比べて、作業面切断法による計算結果の値が過大見積もりとなる傾向があることを示している<sup>5)</sup>。言い換えると室内の凹部をそれと等価な反射率を有する完全拡散面で置き換えて相互反射を計算する場合、天井面の光源に対して水平面の作業面を取り扱うことは一般的であり、D. E. Spencerも松浦と同じ考え方で矩形中庭の上部面太陽光における相互反射の理論解を用いて、等価高<sup>7)</sup>からなる等価反射率計算式を示している<sup>8)9)</sup>。なお松浦の等価反射率式と比べて複雑な形を取っているが、反射率が大きく浅い正方形凹部の解は両者がよく一致している<sup>8)</sup>。

松浦の作業面切断法と光束伝達法との比較を宿谷も行っており、間接照度の値に大きな差がないことを述べている<sup>10)</sup>。また佐藤ら<sup>11)12)</sup>は、床面に大きな照度分布が生じる空間に適用できる等価反射率の推定式について検討する中で、松浦の作業面切断法と比較を行い、両者が一致する条件もあるが、床面反射率が大きいほど両者の差が大きいこと

を示しており、その原因として作業面切断法は上部空間と下部空間が共に一様であることを前提にしている点を指摘している。

廊下や室内の人工照明においては、まずは直接照度分布が一様となるように照明器具の配置がなされるので、間接照度は直接照度よりもさらに一様化するのが通常である。光束伝達相互反射式のように精度の高い計算法に比べて、松浦の作業面切断法による間接照度の簡易計算法の方が実用面に優れているといえる。

火災煙は非常に速く建物内に伝播していくものであり、大空間や複数室あるような大規模建築空間においては、二層ゾーンモデルのような精度の高い簡易計算法が火災安全設計の実務で多用されている。本研究の目的は、二層ゾーンモデルを用いて火災煙下の床面照度を予測する手法を構築することであり、松浦の作業面切断法による間接照度の簡易計算は、本研究のモデルに適用するのが妥当であると考ええる。

## 7-2-2. 煙の無い状態での床面照度簡易計算

煙の無い通常の照明環境において、逐点法を用いて直接照度を求め、また作業面切断法を用いて間接照度を求める。

幅  $X$  [m]×奥行き  $Y$  [m]×高さ  $H$  [m]の矩形の部屋の天井に面光源がある状態を想定する。床面照度は直接照度  $E_d$  と間接照度  $E_{rs}$  をそれぞれに求めて式 7-1 で合算する。

$$E = E_d + E_{rs} \quad \text{式 7-1}$$

### 7-2-2-1. 直接照度<sup>1)</sup>

まず直接照度について示す。室内に煙がないときの、天井にある、輝度  $L_o$  [cd/m<sup>2</sup>]が一様で面積  $s$  [m<sup>2</sup>]の面光源上の一点  $P$  を含む微小面積  $dS$  の光により得られる、床面上の任意の一点  $Q$  の直接照度  $dE_{d_i}$  [lx]を求める。概要を図 7-1 に示す。PQ の距離を  $R_i$  [m]、点  $Q$  への入射角を  $\theta$  [°]とする。

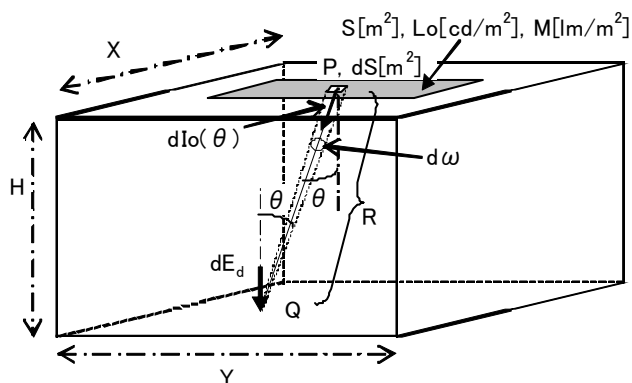


図 7-1 面光源から床面へ到達する直接照度の要素

$dS$  面の  $PQ$  方向の光度  $dI_o$  [cd]を用いると、 $dE_{d_i}$  [lx]は式 7-2 で示され、面光源全体による直接照度  $E_{d_i}$  [lx]は式 7-3 で示される。なお、床面平均直接照度  $E_d$  を求める場合は、式 7-4 を用いる。式中の  $i$  は逐点法における床面直接照度の計算測定数である。

$$dE_{d-i} = \frac{dI_0(\theta) \cdot \cos \theta}{R_i^2} = \frac{(L_0 \cdot dS \cdot \cos \theta) \cdot \cos \theta}{R_i^2} = \frac{L_0 \cdot dS \cdot (\cos \theta)^2}{R_i^2} \quad \text{式 7-2}$$

$$E_{d-i} = L_0 \int_s \frac{(\cos \theta)^2}{R_i^2} dS \quad \text{式 7-3}$$

$$E_d = \sum_i E_{d-i} / i \quad \text{式 7-4}$$

Q点を頂点とし、 $dS$ を含む微小立体角 $d\omega$ は式 7-5 で表されるので、式 7-3 は式 7-6 のようにも表される。 $\Omega$ はQ点から面光源Sを含む立体角である。また面光源は完全拡散性であるので、光束発散度 $M$  [lm/m<sup>2</sup>]はその輝度と式 7-7 の関係がある。したがって式 7-3 と式 7-6 は式 7-8 のようにも表現される。

$$d\omega_i = \frac{\cos \theta \cdot dS}{R_i^2} \quad \text{式 7-5}$$

$$E_{d-i} = L_0 \int_{\Omega} \cos \theta d\omega_i \quad \text{式 7-6}$$

$$M = \pi L \quad \text{式 7-7}$$

$$E_{d-i} = M \int_s \frac{(\cos \theta)^2}{\pi R_i^2} dS = M \int_{\Omega} \frac{\cos \theta}{\pi} d\omega_i \quad \text{式 7-8}$$

式 7-3、式 7-6、式 7-8 において、

$$c_i = \int_s \frac{(\cos \theta)^2}{\pi R_i^2} dS = \int_{\Omega} \frac{\cos \theta}{\pi} d\omega_i \quad \text{式 7-9}$$

とおけば、

$$E_{d-i} = \pi L c_i = M c_i \quad \text{式 7-10}$$

となる。この時の $c_i$  [%]は立体角投射率で、面光源の形や大きさ、受照点との位置関係によってのみ決まる。天井に設置された長方形の面光源の立体角投射率を次の計算過程で求める。例えば図 7-2 のQ点の立体角投射率 $c_1$  (1AOB の4点からなる長方形)は、 $\cos \phi = H/R$ 、 $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 、 $dS = dx dy$ とすれば、式 7-11 で求まる。そして図 7-2 の天井の光源 (1234 の4点からなる長方形) の立体角投射率 $c$ は、 $c_2$  (2COB)  $c_3$  (3COD)  $c_4$  (4AOD) によって、式 7-12 で求まる。

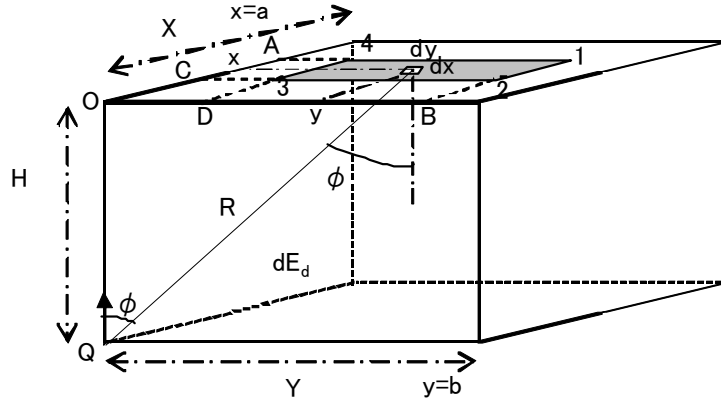


図 7-2 面光源の立体角投射率の算出例

$$c_1 = \int_0^a \int_0^b \frac{h^2}{\pi(x^2 + y^2 + h^2)^2} dx dy = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}} \tan^{-1} \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right)$$

式 7-11

$$c = c_1 - c_2 - c_4 + c_3$$

式 7-12

## 7-2-2-2. 間接照度

### (1) 平行平面間の相互反射式<sup>1)</sup>

続いて間接照度について示す。照明器具が天井面 light(2)と下方壁面 light(1)にそれぞれ存在する空間(図 7-3 左図)について考える。ある作業面の高さに空間を二分し(図 7-3 右図)、その分断された境界部の 2 面において相互反射が生じるとする。この境界面の下面 I と上面 II の両面に一樣な直接照度があり、両面の等価反射率も各面一樣で  $\rho_{e(1)}$   $\rho_{e(2)}$  とすれば、両面に生じる間接照度もそれぞれ一定となる。下面 I 上の間接照度  $E_{ra(2)}$  [lx] は、上面 II 上の全照度 ( $E_{d(1)} + E_{ra(1)}$ ) の反射によって生じ、その反射光は全て I 面に入射する。同様に上面 II 上の間接照度  $E_{ra(1)}$  [lx] も下面 I 上の全照度 ( $E_{d(2)} + E_{ra(2)}$ ) の反射によって生じ、その反射光は全て II 面に入射するので、これをまとめると式 7-13 で表される。

$$\begin{cases} E_{ra(1)} = \rho_{e(1)} (E_{d(2)} + E_{ra(2)}) \\ E_{ra(2)} = \rho_{e(2)} (E_{d(1)} + E_{ra(1)}) \end{cases} \quad \text{式 7-13}$$

なお式 7-13 の直接照度は天井面 light(2)によって下部空間に入射する光束  $F_{(2)1}$  と上部空間に入射する光束  $F_{(2)2}$ 、下方壁面 light(1)によって下部空間に入射する光束  $F_{(1)1}$  と上部空間に入射する光束  $F_{(1)2}$  を用いて式 7-14 で表される。

$$\begin{cases} E_{d(1)} = (F_{1(2)} + F_{2(2)})/A \\ E_{d(2)} = (F_{1(1)} + F_{2(1)})/A \end{cases} \quad \text{式 7-14}$$

この二式を解くと、境界部の間接照度  $E_{ra(2)}$  [lx] は式 7-15 で表される。

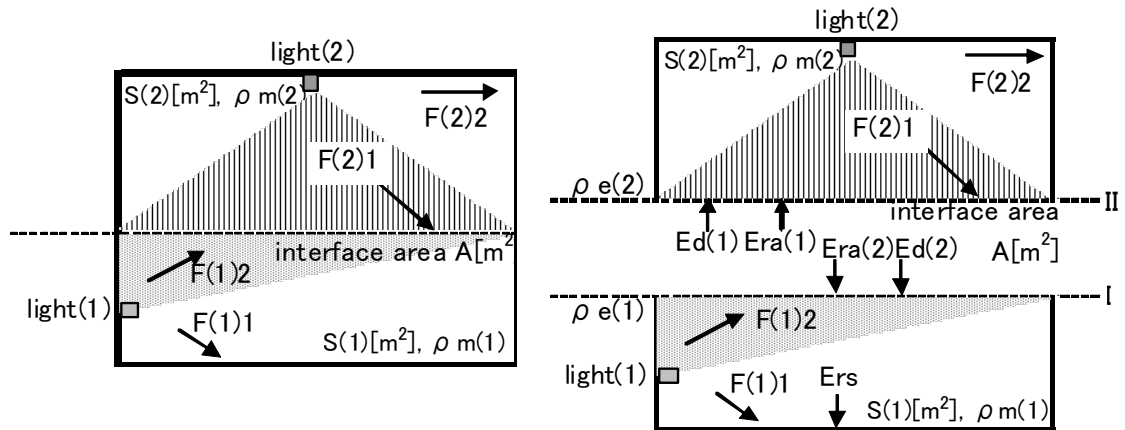


図 7-3 作業面切断法を用いた床面に到達する間接照度算出の概念図

$$E_{ra(2)} = \frac{\{F_{(1)1} + F_{(2)1}\}\rho_{e(1)} + \{F_{(1)2} + F_{(2)2}\}\rho_{e(2)}}{A(1 - \rho_{e(1)}\rho_{e(2)})} \quad \text{式 7-15}$$

## (2) 境界面の等価反射率<sup>1)</sup>

境界部の 2 面の等価反射率  $\rho_{e(1)}$   $\rho_{e(2)}$  は、境界部面積  $A[m^2]$  と二分されたそれぞれの空間の内表面積と平均反射率（下部空間  $S_{(1)}[m^2] \cdot \rho_{m(1)}$ 、上部空間  $S_{(2)}[m^2] \cdot \rho_{m(2)}$ ）を用いて、式 7-16 および式 7-17 で表される。

$$\rho_{e(1)} = \frac{A\rho_{m(1)}}{S_{(1)} - (S_{(1)} - A)\rho_{m(1)}} \quad \text{式 7-16}$$

$$\rho_{e(2)} = \frac{A\rho_{m(2)}}{S_{(2)} - (S_{(2)} - A)\rho_{m(2)}} \quad \text{式 7-17}$$

この等価反射率の計算過程を、作業面によって切断された下部空間を用いて示す（図 7-4）。

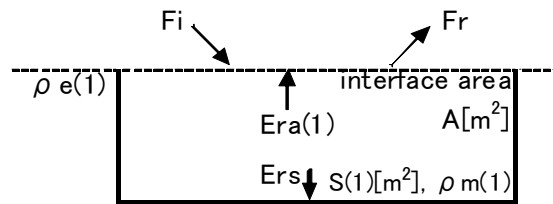


図 7-4 等価反射率の算出に関連する変数

開口部上方から  $F_i[lm]$  の光束が入射し、下部空間内部で反射した後、 $F_r[lm]$  の光束が開口部を通して外へ出るとすると、開口部の等価反射率  $\rho_{e(1)}$  は式 7-18 で表される。

$$\rho_{e(1)} = \frac{F_r}{F_i} \quad \text{式 7-18}$$

また開口部内面に生じた間接照度を  $E_{ra(1)}$  [lx]、下部空間内部表面に生じた間接照度を  $E_{rs}$  [lx] とすると、両者は式 7-19 で表される。

$$E_{ra(1)} = \rho_{m(1)} \left( \frac{F_i}{S_{(1)}} + E_{rs} \right) \quad \text{式 7-19}$$

下部空間内部表面で 1 回反射した光束  $F_i \rho_{m(1)}$  [lm] は、下部空間内面を何回も反射を繰り返して間接照度をつくりつつ下部空間内面で吸収されてしまう。この吸収光束は、開口部から出ていく光束と、内表面で吸収される光束で表される。開口部から出ていく光束は  $E_{ra(1)}$  と開口部面積  $A$  [m<sup>2</sup>] によって式 7-20 右辺第一項で表され、また内表面で吸収される光束は、下部空間内部表面の間接照度  $E_{rs}$  [lx] ・ 下部空間の平均反射率  $\rho_{m(1)}$  ・ 下部空間の表面積  $S_{(1)}$  によって式 7-20 右辺第二項で表される。

$$F_i \rho_{m(1)} = A E_{ra(1)} + S_{(1)} E_{rs} (1 - \rho_{m(1)}) \quad \text{式 7-20}$$

一方、開口面積を  $A$  [m<sup>2</sup>] の開口部を通して  $F_r$  [lm] の光束が外部に出るので、

$$F_r = A E_{ra(1)} \quad \text{式 7-21}$$

が成立し、これら 4 式 (式 7-18～式 7-21) を解くと、最終的に前出式 7-16 が導かれる。式 7-17 についても同様の過程をへて導かれる。

### (3) 床面の間接照度

式 7-19 と式 7-20 を  $E_{rs}$  [lx] について解くと、式 7-22 で表される。

$$E_{rs} = \frac{F_i \rho_{m(1)} (1 - A/S_{(1)})}{A \rho_{m(1)} + S_{(1)} (1 - \rho_{m(1)})} \quad \text{式 7-22}$$

図 7-3 における床面の間接照度算出において、下部空間に入射する光束  $F_i$  [lm] は式 7-23 で表される。

$$F_i = F_{(1)1} + F_{(2)1} + A E_{ra(2)} \quad \text{式 7-23}$$

すなわち式 7-22 と式 7-23 を用いると、床面の間接照度  $E_{rs}$  [lx] は式 7-24 で表される。

$$E_{rs} = \frac{(F_{(1)1} + F_{(2)1} + A E_{ra(2)}) \rho_{m(1)} (1 - A/S_{(1)})}{A \rho_{m(1)} + S_{(1)} (1 - \rho_{m(1)})} \quad \text{式 7-24}$$

### (4) 煙がない空間の床面照度

以上、式 7-1 に式 7-4 と式 7-24 の結果を代入して、煙のない通常的环境における床面照度を算出することができる。

### 7-2-3. 煙の有る状態での床面照度簡易計算のモデル

煙の有る火災時の床面照度も、前項と同様に直接照度  $E_d'$  [lx] と間接照度  $E_{rs}'$  [lx] をそれぞれに求めて式 7-25 で合算して求めるが、下記のように対応する。

$$E' = E_d' + E_{rs}' \quad \text{式 7-25}$$

- (1) 直接照度  $E_d'$  は、煙の中を光が通過する際に生じる距離減衰および煙粒子の付着<sup>2)</sup>を考慮し、散乱成分は含まない。
- (2) 間接照度  $E_{rs}'$  は、煙層で生じる吸収と散乱の両現象、および煙の付着<sup>13)</sup>を考慮する。また煙層の（煙粒子が層の中に充満している）状態を、層境界面にある透過率・反射率を持つ仮想膜がある状態に置き換えて<sup>14)</sup>、作業面切断法における等価反射率へ対応させる<sup>15)</sup>。

#### 7-2-3-1. 直接照度

まず直接照度について示す。室内に煙があることによって、ある光源上の点Pの点Q方向への輝度  $L_o$  [cd/m<sup>2</sup>] が  $L'$  [cd/m<sup>2</sup>] になる現象は、ランベルト・ベールの法則に基づき、光が煙層を通過する距離  $r_i$  [m] と光学的煙濃度  $C_s$  [1/m] を用いて、式 7-26 で示される。

$$\frac{L'}{L_o} = e^{-C_s r_i} \quad \text{式 7-26}$$

この式には、光源に対する煙の付着が考慮されていないので、 $L_o$  [cd/m<sup>2</sup>] に対して煙の光学的濃度と煙粒子の付着の関係<sup>2)</sup>を導入する。すなわち、天井にある、輝度  $L_o$  [cd/m<sup>2</sup>] が一様で面積  $S$  [m<sup>2</sup>] の、面光源上の一点Pを含む微小面積  $dS$  の光が、煙層を通過して床面上の一点Qに到達する際の直接照度  $dE_{d-i}'$  [lx] は、式 7-27 で表される。このときPQの距離を  $R_i$  [m]、Q点への入射角を  $\theta$  [°]、付着係数を  $\eta$  [m/s] とする（図 7-5）。

$$dE_{d-i}' = \left(1 - \int_t \eta C_s dt\right) L_o \cdot e^{-C_s r_i} \frac{dS \cdot (\cos \theta)^2}{R_i^2} \quad \text{式 7-27}$$

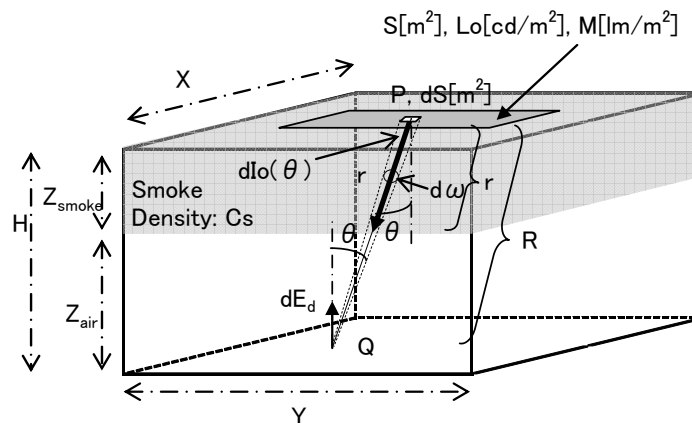


図 7-5 面光源から発せられた光が煙層を通過して床面へ到達する直接照度の要素

なお、床面平均直接照度  $E_d'$  を求める場合は、式 7-28 を用いる。式中の  $i$  は逐点法における床面直接照度の計算測定数である。

$$E_d' = \sum_i E_{d-i}' / i = \left\{ \sum_i \left( 1 - \int_t \eta C_s dt \right) L_0 \cdot e^{-C_s f_i} \int_s \frac{(\cos \theta)^2}{R_i^2} dS \right\} / i \quad \text{式 7-28}$$

### 7-2-3-2. 間接照度

#### (1) 煙層境界面の等価反射率の取り扱い<sup>3)</sup>

続いて間接照度について示す。まず煙層境界面の等価反射率の取り扱いについて述べる。図 7-6 左図に示すような煙層の（煙粒子が層の中に充満している）状態を、層境界部上面に透過率  $\tau_s$ ・反射率  $\rho_s$  の値を持つ仮想膜が存在する状態（図 7-6 右図）に置き換えて、作業面切断法における煙層境界部上面の等価反射率  $\rho_{e(2)}'$  へ対応させる。なお境界部下面の等価反射率  $\rho_{e(1)}$  は前出式 7-16 と同様である。

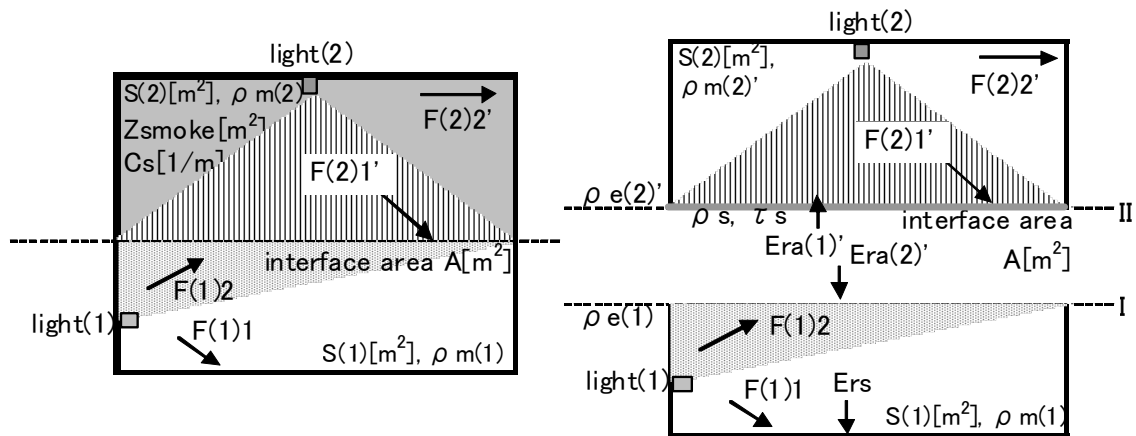


図 7-6 煙層を作業面切断法で取り扱う際の間接照度算出の概念図

煙層境界部上面の等価反射率  $\rho_{e(2)}'$  の計算過程を、煙層境界面によって切断された上部空間で示す（図 7-7）。

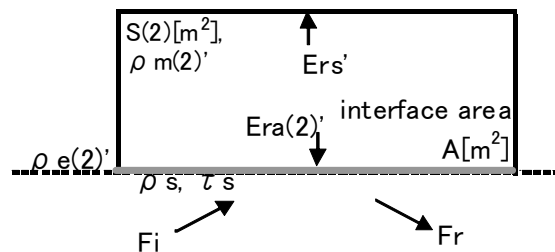


図 7-7 煙層境界部上面の等価反射率の算出に関連する変数

開口部下方から  $F_i$  [lm] の光束が入射し、仮想膜を透過して煙層である上部空間内部に到達する光束は  $\tau_s F_i$  [lm] となる。開口部内面に生じた間接照度を  $E_{ra(2)}'$  [lx]、上部空間



内部表面に生じた間接照度を  $E_{rs}' [\text{lx}]$  とすると、両者は式 7-29 で表される。このとき上部空間の内表面積は  $S_{(2)} [\text{m}^2]$  で内表面反射率は  $\rho_{m(2)}'$  である。

$$E_{ra(2)}' = \rho_{m(2)}' \left( \frac{\tau_s F_i}{S_{(2)}} + E_{rs}' \right) \quad \text{式 7-29}$$

また上部空間内部表面で 1 回反射した光束  $\tau_s F_i \rho_{m(2)}' [\text{lm}]$  は、それによって上部空間内部表面の間接照度をつくりつつ、上部空間内面で吸収されてしまうが、その吸収光束は開口部から出ていく光束と、内表面で吸収される光束で表される。開口部から出ていく光束は  $E_{ra(2)}'$  と開口部面積  $A [\text{m}^2]$  および仮想膜の反射率  $\rho_s$  によって式 7-30 右辺第一項で表され、また内表面で吸収される光束は、上部空間内表面の間接照度  $E_{rs}' [\text{lx}] \cdot$  上部空間の平均反射率  $\rho_{m(2)}' \cdot$  上部空間の表面積  $S_{(2)}$  により式 7-30 右辺第二項で表される。

$$\tau_s F_i \rho_{m(2)}' = (1 - \rho_s) A E_{ra(2)}' + S_{(2)} E_{rs}' (1 - \rho_{m(2)}') \quad \text{式 7-30}$$

一方、仮想膜から下方へ向かう光束  $F_r [\text{lm}]$  は、仮想膜へ入射した光束  $F_i [\text{lm}]$  が仮想膜表面で反射した成分と、上部空間内部で反射した後に仮想膜を透過し開口部下方へ向かう成分からなり、式 7-31 で表される。

$$F_r = \rho_s F_i + \tau_s A E_{ra(2)}' \quad \text{式 7-31}$$

これら 3 式(式 7-29～式 7-31) を解くと、最終的に煙層境界部上面の等価反射率  $\rho_{e(2)}'$  は式 7-32 で表すことができる。なお煙層（上部空間）の内表面反射率  $\rho_{m(2)}'$  は、初期反射率  $\rho_{e(2)}$  が煙の付着によって変化する<sup>13)</sup>ことを考慮して、式 7-33 で表す。式 7-33 での  $\rho_{smoke}$  は煙粒子の反射率であり、本研究では盛期火災などで発生する黒煙の場合に  $\rho_{smoke} = 0.1$  とする（燃烧初期や末期に見られるくん焼煙（白煙）では  $\rho_{smoke} = 1.0$  と考えられる<sup>16)</sup> 注<sup>1)</sup> が、その状態では粒子の付着が起こらないので<sup>13)</sup>、実際には  $\rho_{e(2)}$  は付着によって変化しない）。

$$\rho_{e(2)}' = \rho_s + \frac{A \rho_{m(2)}' \tau_s^2}{S_{(2)} - \rho_{m(2)}' (S_{(2)} - A + A \rho_s)} \quad \text{式 7-32}$$

$$\rho_{m(2)}' = \rho_{m(2)} - (\rho_{m(2)} - \rho_{smoke}) \int_t \eta C_s dt \quad \text{式 7-33}$$

なお仮想膜の透過率  $\tau_s$  と反射率  $\rho_s$  は本項では未知数であるが、煙の光学的濃度や煙層の厚さによって変化すると考えられる。それゆえ、次項では水溶液を用いた模型実験を行い、これらの値を求めることとする。

## (2) 煙層下の床面照度<sup>15)</sup>

前出式 7-15 に用いた作業面切断法を同様に使って、煙層の高さに空間を二分し（前出図 7-6 右図）、その分断された境界部の 2 面において相互反射が生じるとすると、境

界下面 I 上の間接照度  $E_{ra(2)'} [lx]$  は式 7-34 で表される。この時、天井面 light(2) によって下部空間に入射する光束を  $F_{(2)1}'$ 、上部空間に入射する光束を  $F_{(2)2}'$ 、下方壁面 light(1) によって下部空間に入射する光束を  $F_{(1)1}$ 、上部空間に入射する光束を  $F_{(1)2}$ 、境界部上面 II の等価反射率を  $\rho_{e(2)'}$ 、境界部下面 I の等価反射率を  $\rho_{e(1)}$  とする。なお  $\rho_{e(1)}$  は式 7-16 で、 $\rho_{e(2)'}$  は式 7-32 で既に定義されている。

$$E_{ra(2)'} = \frac{\{ (F_{(1)1} + F_{(2)1}') \rho_{e(1)} + (F_{(1)2} + F_{(2)2}') \} \rho_{e(2)'}}{A(1 - \rho_{e(1)} \rho_{e(2)'})} \quad \text{式 7-34}$$

式 7-34 において煙層の中にある光束  $F_{(2)1}'$  と  $F_{(2)2}'$  は式 7-35 と式 7-36 で表される。式 7-35 の  $r_i$  は煙層を光が通過する距離[m]、 $C_s$  は煙の光学的濃度[1/m]である。 $k$  は既往研究<sup>16)</sup>を参考にして、くん焼煙や白煙の時に  $k=1$ 、有炎燃焼煙や黒煙の時に  $k=0.5$  とするが、その精度については次項で確認する。

$$F_{(2)1}' = \sum_i F_{(2)1-i} \cdot e^{-C_s r_i} + k \left( \sum_i F_{(2)1-i} - \sum_i F_{(2)1-i} \cdot e^{-C_s r_i} \right) \quad \text{式 7-35}$$

$$F_{(2)2}' = F_{(2)2} \quad \text{式 7-36}$$

さらに前出式 7-24 を応用して、煙層下の床面の間接照度  $E_{rs}' [lx]$  は、式 7-37 で表される。

$$E_{rs}' = \frac{(F_{(1)1} + F_{(2)1}' + A E_{ra(2)'}) \rho_{m(1)} (1 - A/S_{(1)})}{A \rho_{m(1)} + S_{(1)} (1 - \rho_{m(1)})} \quad \text{式 7-37}$$

以上、式 7-25 に式 7-28 と式 7-37 の結果を代入して、火災煙下の環境における床面照度を算出することができる。

### 7-3. 水溶液模型実験による仮想膜反射率・透過率の決定

煙層の有る状態での間接照度を計算するために設定した仮想膜の透過率  $\tau_s$  と反射率  $\rho_s$  は未知数であるが、これらは煙の光学的濃度や煙層の厚さによって変化すると考えられる。本項では水溶液を用いた模型実験を行いこれらの値を算出する。さらに前項のモデルの精度を確認する。

#### 7-3-1. 実験

実験は外光を遮断した暗室内に設置した、図 7-8 の実験装置を用いて行なった。実験装置は上面が発光する光源ボックス上に透明アクリル水槽を設置し、水槽内に測定対象となる一般的な事務所を想定した空間模型を設置している。空間模型は、下側にスクエア型の照明器具を乳白の拡散透過面の配置で模した天井面を水平に設置し、その上に室高さに対応した壁面を鉛直に設置し、その上部に照度計受光部寸法に合わせて穴を開けた床面を設置して構築した。

照明器具は均等拡散性の面光源に近い照明器具のデータを利用して、光束法において内表面反射率を天井 70%・壁 50%・床 10%、保守率 0.69 で作業面 0.8[m]の照度 750[lx]が達成できる配置とした。煙層とその高さは、白と黒の塗料（同じメーカーの同種のもの Poster color を利用しており、粒子径は同じであると考える。なお粒子反射率は 0.8678 と 0.0137 である）の水溶液でその水深により調整した。床面に占める照度計受光部の面積割合や照度計の数の制限から照度測定点全てを同時に測定せず、数回に分けて測定するため照度計受光部用の穴の配置が異なる数枚の床面を準備した。対象空間の天井面光源配置および床面照度測定位置の一例を図 7-9 に示す。図中の斜線網部が照明器具、丸印が照度計の位置を表しており、丸印のトーンの違いが 3 種類の照度計受光部設置パターンを意味している。実験では複数台の照度計（Konica Minolta 製 T-10M）で複数点の床面照度と光源ボックス内のモニター照度を同時に測定した。個々の照度計の計測値の誤差は 1%以内であり、照度測定が複数回に及んだ床面照度はモニター照度の比に基づいて補正した。

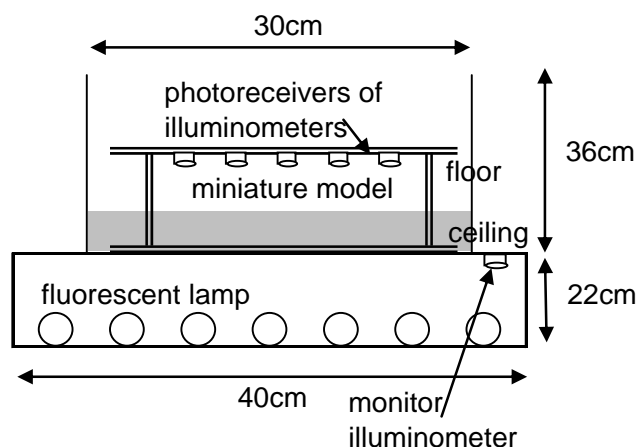


図 7-8 水溶液を用いた縮尺実験模型（断面図）

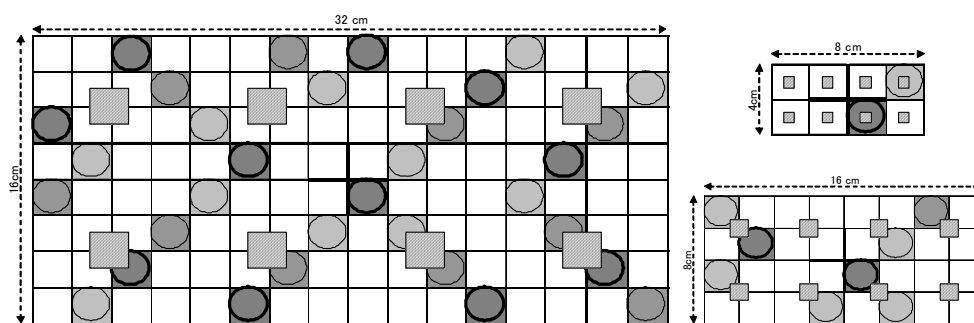


図 7-9 天井面光源および床面照度測定位置の例（想定空間  $4 \times 8 \times 3$ ）  
縮尺：左 1/25・右下 1/50・右上 1/100

実験条件を表 1 に示す。変数は、煙層高さ、光学的煙濃度、煙粒子の色、室形状、室内表面反射率、縮尺である。なお本項で行った実験条件において、反射率の異なる天井面の光源面となる乳白拡散透過面の透過率が異なったため、二次元輝度計（Konica

Minolta 製 CA2000A) を用いて測定した光源面の平均輝度とモニター照度との関係を求めておき、各測定時のモニター照度に対応する光源面の平均輝度  $L$  で実測された床面照度  $E$  を基準化した値  $E/L$  で結果を示すこととした。

表 7-1 実験条件

光散乱物質	$\rho_{\text{smoke}}$ 反射率(色)	0.868(白)、0.014(黒)
	$C_s$ 光学的濃度[1/m]	0、0.125、0.25、0.5、1.0、2.0、4.0
	$Z_{\text{smoke}}$ 煙層高さ[m]	0.25、0.50、0.75、1.0、1.5、2.0
室性状	$\rho_m$ 内表面反射率	0.05、0.12、0.35、0.83
	寸法 間口×奥行×高さ[m]	4×4×3、4×8×3、8×6×3、8×8×3、8×12×3
縮尺	$1/\alpha$	1/25、1/50、1/100

### 7-3-2. 縮尺の違いに対する光学的濃度計算の妥当性<sup>17)</sup>

光学的濃度は[1/m]の次元を持ち、距離を乗じた値が煙層の透過率と対応する。実物大空間（1/1）における光学的濃度  $C_{s\_ (1/1)}$  に対して、縮尺  $1/\alpha$  の空間では、その光学的濃

度を  $C_{s\_ (1/\alpha)} = \alpha \cdot C_{s\_ (1/1)}$  とすることで、透過率が同じ煙層を設定したことになる。

そこで光学的濃度の縮率の取り扱いについて検討した。実験条件は表 7-1 の内の、室内表面反射率 0.35・室形状 4×4×3[m]と 4×8×3 [m]・光散乱物質反射率 2 種（白と黒）・煙層高さ 0.5 と 2.0[m]であり、縮尺 1/25、1/50、1/100 に応じて表 7-1 に示す光学的濃度を設定した。

図 7-10 に室形状が 4×4×3[m]の結果を示す。図の横軸は光学的濃度  $C_s$ 、縦軸は基準化照度  $E/L$ 、凡例は縮尺であり、煙層高さと光散乱物質の色毎に図を分けて示している。白粒子の縮尺 1/25 の結果が他の縮尺より  $E/L$  値が低い結果が見られるが、全体的には縮尺が異なっても基準化照度  $E/L$  が変わらない傾向が認められており、縮尺の違いに対する光学的濃度計算は妥当であると考えられる。室形状が 4×8×3[m]の結果を図 7-11 に示すが、同様に縮尺が異なっても基準化照度  $E/L$  が変わらない傾向が認めら

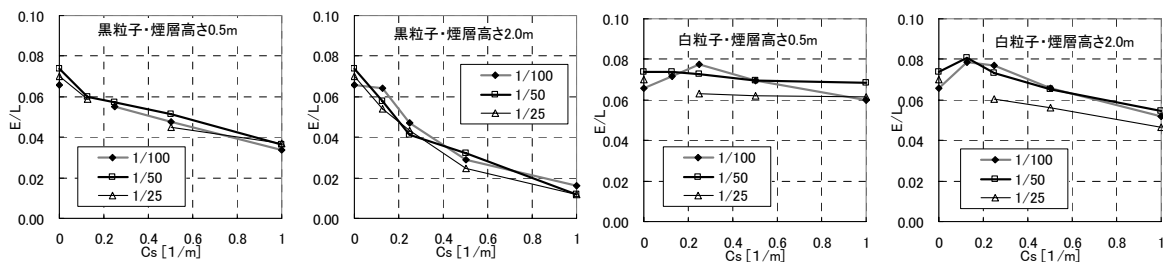


図 7-10 4×4×3[m]・内装反射率 0.35 における縮率の検討結果

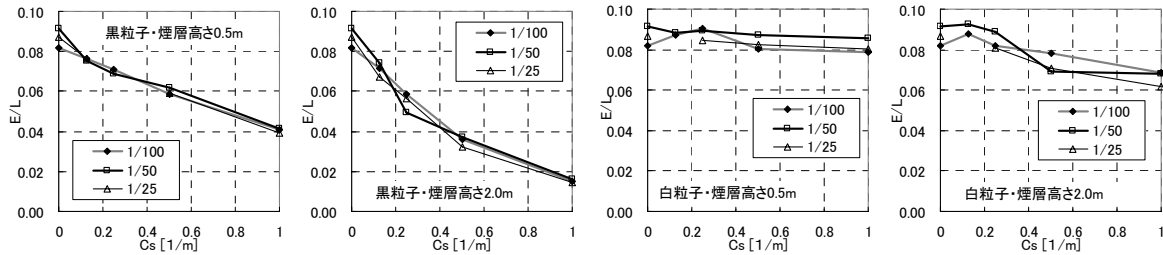


図 7-11  $4 \times 8 \times 3$  [m]・内装反射率 0.35 における縮率の検討結果

れる。すなわち、縮尺  $1/\alpha$  の空間では、その光学的濃度を  $C_{s_{(1/\alpha)}} = \alpha \cdot C_{s_{(1/1)}}$  とすることで、実空間の光の伝達を模擬可能であることを確認した。

これらの結果は、基準化照度に対する煙粒子の特性を表してもいる。光散乱物質が黒粒子の場合、光学的濃度が高くなるほど基準化照度  $E/L$  が小さくなり、また煙層が高いほど顕著であり、光が吸収されることが顕著に表されている。一方、光散乱物質が白粒子の場合、煙層高さが 0.5[m] では光学的濃度が異なっても基準化照度  $E/L$  には殆ど差異はなく、粒子間の散乱により吸収成分が相殺されているが、煙層高さが 2.0[m] の時は光学的濃度が高い条件で吸収により基準化照度  $E/L$  が小さくなる傾向が見られる。これは多数の白粒子が存在する場合に粒子による光の吸収が無視できなくなるためと考えられる。なお、空間が大きくなると室指数が大きくなり、粒子のない状態（光学的濃度  $Cs=0$  [1/m]）の基準化照度  $E/L$  の値大きくなるが、光学的濃度や煙層高さに対してほぼ同様の傾向が確認された。

### 7-3-3. 煙性状および空間性状と基準化照度の関係

縮尺 1/50・内装反射率  $\rho m=0.35$  の条件で、光学的煙濃度  $Cs$ ・煙層高さ  $Z_{smoke}$  (x 軸)・基準化照度  $E/L$  の関係について、想定空間・粒子の反射率(色)毎に示したものを図 7-12 に示す。粒子の色に関わらず、想定空間が大きくなるほど煙のない状態 ( $Z_{smoke}=0$ )  $E/L$  の値が大きい。黒粒子では、 $Z_{smoke}$  が高く  $Cs$  が高いほど  $E/L$  が低くなり、両者が共に影響することがわかる。白粒子の結果は黒粒子ほど顕著ではないが、 $Cs$  が 1 [1/m] 以下の条件では  $Z_{smoke}$  と  $Cs$  が高くなると緩やかに  $E/L$  が低くなる。 $Cs$  が大きい値の場合 (2 [1/m] と 4 [1/m]) 黒粒子と同様に  $Z_{smoke}$  が高いほど  $E/L$  が低くなる傾向が顕著になり、粒子密度が大きくなることによる減衰が確認される。

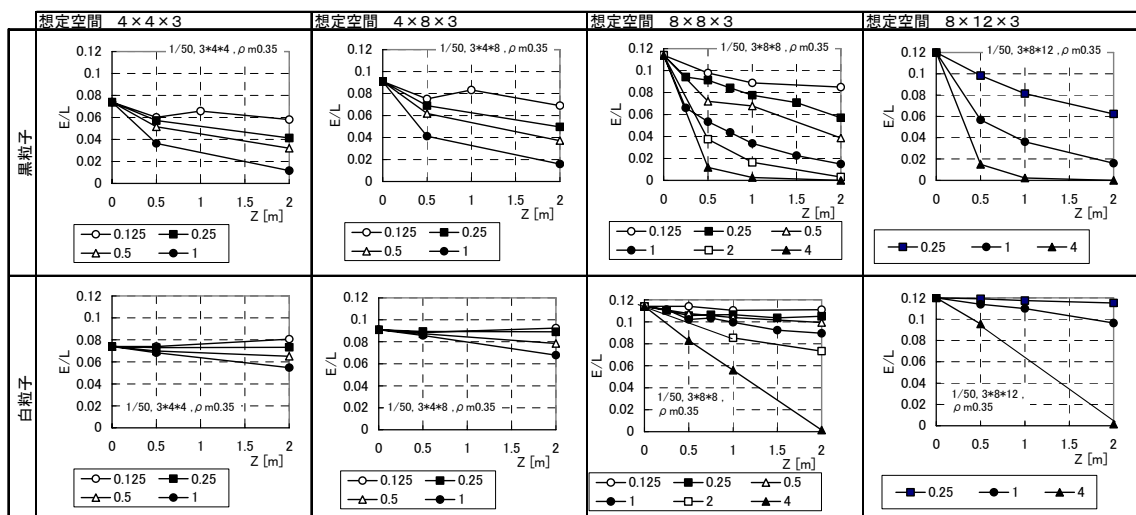


図 7-12 光学的濃度(凡例)・煙層高さ(x 軸)と基準化照度の関係(縮尺 1/50・内装反射率 0.35)

3 者の関係について x 軸を光学的煙濃度に変更して再表現したものを図 7-13 に示す。やはり粒子の色に関わらず  $Z_{smoke}$  と  $Cs$  が高くなるほど  $E/L$  が低くなる傾向が矛盾無く認められる。

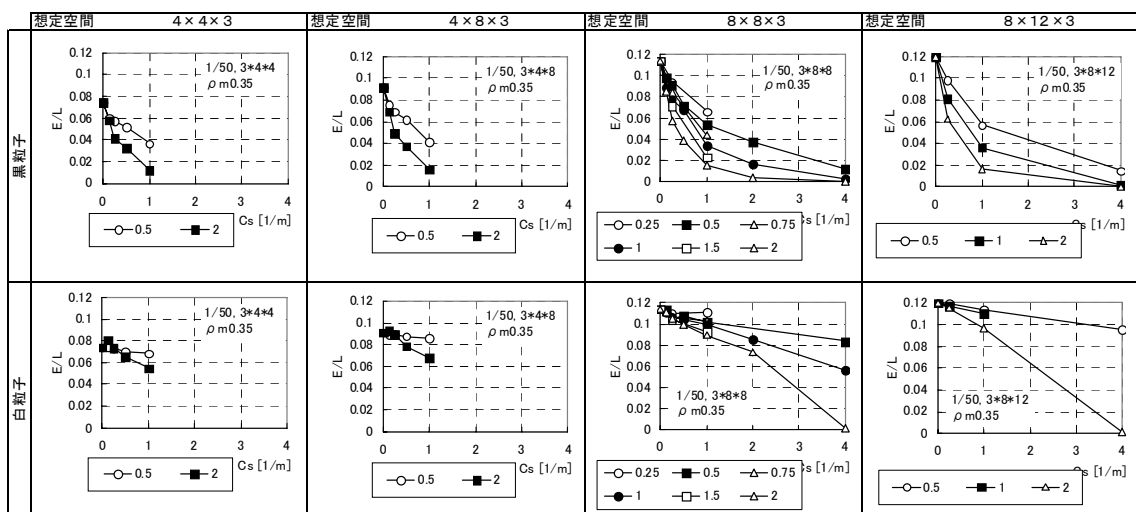


図 7-13 光学的濃度(x 軸)・煙層高さ(凡例)と基準化照度の関係(縮尺 1/50・内装反射率 0.35)

縮尺 1/50・想定空間  $8 \times 8 \times 3$  の条件で、基準化照度  $E/L$  に対する内装反射率  $\rho_m$  の影響について図 7-14 に示す。煙粒子が存在する条件(図の○プロット  $Cs=0$  以外)について比較すると、黒粒子よりも白粒子の方が同じ条件での  $E/L$  が全て高い。黒粒子・ $Z_{smoke}=2$  の条件では内装反射率が高くなっても  $E/L$  は極僅かしか増加しないが、それ以外の条件では内装反射率が高くなるほど  $E/L$  も高くなる傾向がみられ、粒子や内装表面に反射した散乱光の存在が認められる。

このように、煙性状(粒子の反射率  $\rho_{smoke}$ ・光学的煙濃度  $Cs$ ・煙層高さ  $Z_{smoke}$ )と空

間性状（想定空間・内装反射率  $\rho_m$ ）のいずれもが基準化照度  $E/L$  に影響することが明らかとなった。

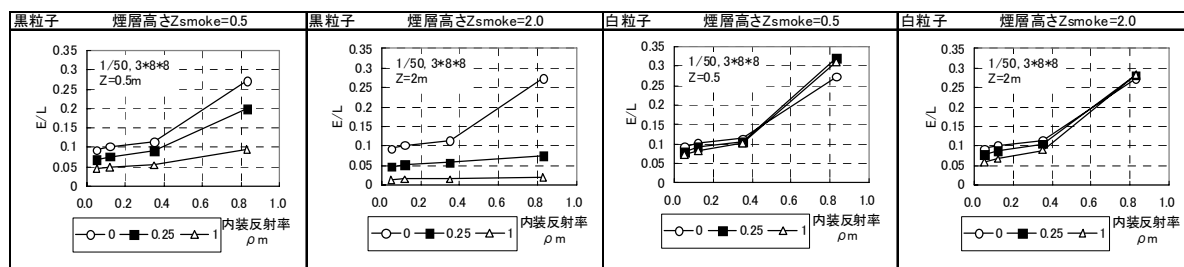


図 7-14 縮尺 1/50・想定空間  $8 \times 8 \times 3$  における基準化照度に対する内装反射率の影響

#### 7-3-4. $CsZ_{smoke}$ と基準化照度の関係

前項において、光学的煙濃度  $Cs$  と煙層高さ  $Z_{smoke}$  が基準化照度  $E/L$  に影響することを示した。この両者を掛け合わせた指標について、神<sup>16)</sup>は  $CsZ_{smoke}=const.$  なる関係があることを示している。そこで本項では、実験結果に対して  $CsZ_{smoke}$  を求めて再表現する。それに先立ち、今回の縮尺 1/50 の実験結果を  $CsZ_{smoke}$  で取り扱う際の、 $Cs$  および  $Z_{smoke}$  との対応およびデータの分布状況について表 7-2 で確認する。同じ  $CsZ_{smoke}$  の値となる  $Cs$  と  $Z_{smoke}$  の組合せは  $CsZ_{smoke}=0.5$ （縮尺 1/50、内装反射率  $\rho_m=0.35$ ）の時最大 11 組となる。

表 7-2  $CsZ_{smoke}$  の値となる  $Cs$  と  $Z_{smoke}$  の組合せとデータ分布(縮尺 1/50)

$CsZ$	$Z$	$Cs$	黒粒子								白粒子							
			0.05	0.12	0.35	0.83	0.05	0.12	0.35	0.83	0.05	0.12	0.35	0.83	0.05	0.12	0.35	0.83
0	0	0	8×8	8×8	4×4	4×8	8×6	8×8	8×12	8×8	8×8	8×8	4×4	4×8	8×6	8×8	8×12	8×8
0.06	0.25	0.25			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
0.13	0.5	0.25			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
0.19	0.75	0.25			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
0.25	0.25	1			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	0.5	0.5			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	1	0.25			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	2	0.13			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
0.38	1.5	0.25			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
0.5	0.5	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
	1	0.5			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	2	0.25		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
0.75	0.75	1			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
1	0.5	2			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	1	1			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	2	0.5			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
1.5	1.5	1			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
2	0.5	4			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	1	2			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	2	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
4	1	4			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
	2	2			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
8	2	4			1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1

図 7-15 に縮尺 1/50・内装反射率  $\rho_m=0.35$  の条件における  $CsZ_{smoke}$  と  $E/L$  と想定空間の関係を示す。なお同じ条件に複数の結果がある場合は平均値を用いた。黒粒子では、 $CsZ_{smoke}$  が小さい条件では想定空間の大きさに伴い  $E/L$  が大きくなるが、 $CsZ_{smoke}$  が 2 以上だと想定空間による  $E/L$  の違いが見られなくなり、全体的に  $CsZ_{smoke}$  と  $E/L$  には指数関

数の関係が見られる。白粒子では想定空間が大きいほど、また  $CsZ_{smoke}$  が小さいほど  $E/L$  が大きくなる傾向が示されており、回帰直線はほぼ平行である。

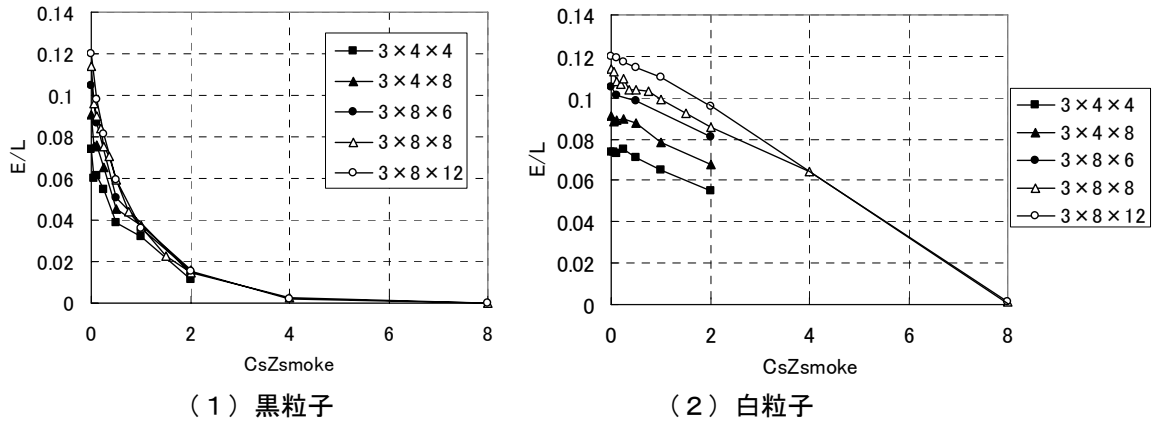


図 7-15  $CsZ_{smoke}$  と  $E/L$  と想定空間の関係 (縮尺 1/50・内装反射率  $\rho_m=0.35$ )

図 7-16 に縮尺 1/50・想定空間  $3 \times 8 \times 8$  の条件における  $CsZ_{smoke}$  と  $E/L$  と内装反射率の関係を示す。黒粒子では  $CsZ_{smoke}$  が小さい条件において内表面反射率の増加に伴い  $E/L$  が大きくなるが、 $CsZ_{smoke}$  が 2 以上だと内装反射率による  $E/L$  の違いが見られなくなり、全体的に  $CsZ_{smoke}$  と  $E/L$  には指数関数の関係が見られる。白粒子では内装反射率が大きく  $CsZ_{smoke}$  が小さいほど  $E/L$  が大きくなる傾向が示されており、回帰直線はほぼ平行である。

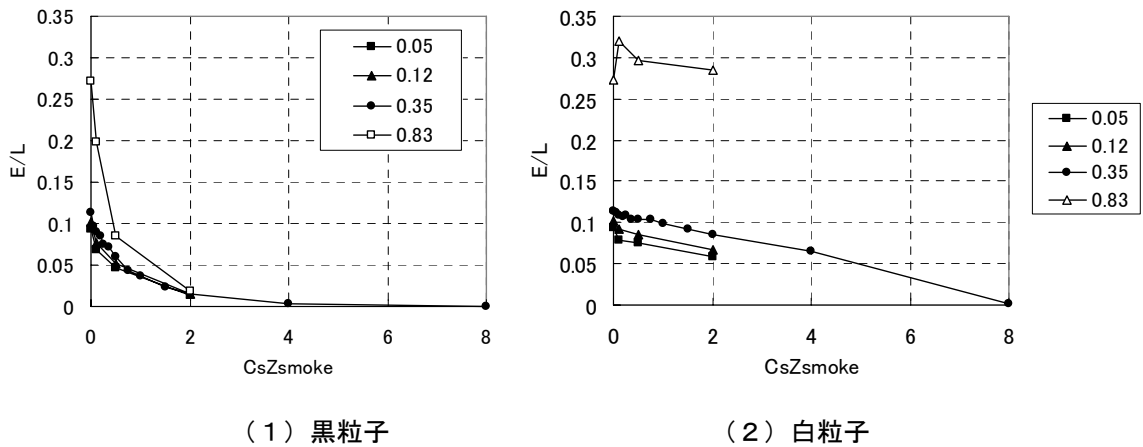


図 7-16  $CsZ_{smoke}$  と  $E/L$  と内装反射率の関係 (縮尺 1/50・想定空間  $3 \times 8 \times 8$ )

### 7-3-5. 平均光路長 $d^{18)}$

光学的濃度 (吸収係数)  $Cs$  の気体中のある距離  $d$  を光 (輻射) が通過する時、前出式 7-26 に示したランベルト・ベールの法則が成立する。この気体がある体積をもつ場合、気体塊全体の輻射率  $\varepsilon$  は式 7-38 で表される。

$$\varepsilon = 1 - e^{-Cs d} \quad \text{式 7-38}$$



気体塊の形状が球体であれば全ての方向で輻射の通過距離が等しくなるが、区画内の煙層を代替する仮想膜を考える場合、それは球体形状ではなく方向により通過距離が異なる。このため輻射率を求めるためには、気体塊全体にわたって方向毎に輻射エネルギーの吸収量を積分しなければならないが、通常は平均的な通過距離である平均光路長 $\bar{d}$  (*Mean Beam Length*) を用いて近似する<sup>19)</sup>。平均光路長は気体の性質に無関係に、気体塊の形状によってのみ決定される。代表的な気体塊の形状における平均光路長の算定式が提案されている<sup>20)</sup>が、光学的に厚い気体塊に対する平均光路長は、その気体塊の表面積 $S$ と体積 $V$ を用いて次式 7-39 で表される<sup>18)</sup>。

$$\bar{d} = 3.6 \frac{V}{S} \quad \text{式 7-39}$$

前出表 7-2 に示したように、 $CsZ_{smoke}$ が等しくても光学的煙濃度 $Cs$ と煙層高さ $Z_{smoke}$ の組合せが異なる条件が今回の実験において存在しており、さらに想定空間の形状も異なっている。例として最も多い組合せが存在した条件 $CsZ_{smoke}=0.5$ について、 $C_s \bar{d}$ の値を求め表 7-3 に示す。想定空間の形状と煙層高さの組合せによって、平均光路長が煙層高さより長くなる場合や短くなる場合がある。また $CsZ_{smoke}=0.5$ に対して $C_s \bar{d}$ の範囲は0.45～0.815 と様々な値をとる。

表 7-3  $CsZ_{\text{smoke}}=0.5$  の条件での  $C_s \bar{d}$  の計算結果 (縮尺  $1/50 \cdot \rho m=0.35$ )

想定空間	煙層高さZ	表面積S	体積V	平均光路長d	光学的濃度Cs	Cs*Z	Cs*d
8×8×3	0.5	144	32	0.8	1	0.5	0.8
	1	160	64	1.44	0.5		0.72
	2	192	128	2.4	0.25		0.6
8×12×3	2	272	192	2.541	0.25		0.635
8×6×3		152	96	2.274			0.568
4×8×3		112	64	2.057			0.514
4×4×3		64	32	1.8			0.45
8×12×3	0.5	212	48	0.815	1		0.815
8×6×3		110	24	0.785			0.785
4×8×3		76	16	0.758			0.758
4×4×3		40	8	0.72			0.72

#### 7-3-6. 仮想膜の透過率・反射率の関数決定

本項の目的は前出式 7-32 にある仮想膜の透過率  $\tau_s$  と反射率  $\rho_s$  を求めることである。仮想膜の透過率  $\tau_s$  と反射率  $\rho_s$  について、想定されるべき条件について整理する。

仮想膜の透過率  $\tau_s$  は煙が存在しない ( $Cs=0$ ) 時は  $\tau_s=1$  となるべきである。また煙粒子自体が殆ど透過しない特性を持つ場合、煙の光学的濃度が高くなると  $\tau_s$  は小さくなり  $Cs=\infty$  で  $\tau_s=0$  となる。一方、水滴のように粒子自体が透過率  $\tau_k$  を持つ場合、 $Cs=\infty$  で  $\tau_s=\tau_k$  となる。

仮想膜の反射率  $\rho_s$  は煙が存在しない ( $Cs=0$ ) 時は  $\rho_s=0$  となるべきである。黒煙の粒子のように反射率が殆ど 0 に近い場合、光学的濃度が高くなっても  $\rho_s$  は殆ど変わらず、 $Cs=\infty$  で  $\rho_s=0$  となる。一方、煙粒子自体が透過率  $\rho_k$  を持つ場合、 $Cs=\infty$  で  $\rho_s=\rho_k$  となり、くん焼煙の白粒子のように非常に反射率が高い場合は  $Cs=\infty$  で  $\rho_s=1$  となる。

また仮想膜に代替する煙層の形状に対応させるため、煙層高さ  $Z_{\text{smoke}}$  でなく、式 7-39 で求まる平均光路長  $\bar{d}$  を用いる。

以上の条件を考慮すると、仮想膜の透過率  $\tau_s$  と反射率  $\rho_s$  には次のような関係式が成立すると予想できる。

$$\tau_s = e^{-aC_s \bar{d}} + \tau_k \left( 1 - e^{-aC_s \bar{d}} \right) \quad \text{式 7-40}$$

$$\rho_s = \rho_k \left( 1 - e^{-bC_s \bar{d}} \right) \quad \text{式 7-41}$$

但し、 $\tau_k$  と  $\rho_k$  は火災ステージ毎における代表的な煙粒子の特性を表し、式の有効範囲は  $0 < \tau_s \leq 1$ ,  $0 < \rho_s \leq 1$  である。式 7-40 は、前章式 6-23 で示した煙層にある任意の視対象輝度の近似式第二項の、煙層内の散乱輝度  $L_{\text{smoke}}$  の係数と同じ形であることが興味深い。

本項で取り扱った水溶液の粒子と実際の火災煙の粒子とは同一の性質ではないが、黒粒子は有炎燃焼時の黒煙、白粒子はくん焼時の白煙を想定して実験を行っている。式 7-38 と式 7-39 の未知数  $\tau_k$ 、 $\rho_k$ 、 $a$ 、 $b$ 、について、Excel のソルバー機能を用いて実験結果から解き、最終的に粒子の色毎に下記の関係式を抽出した。

黒粒子の場合

$$\begin{cases} \tau_s = e^{-5C_s \bar{d}} \\ \rho_s = 0 \end{cases}$$

白粒子の場合

$$\begin{cases} \tau_s = e^{-25C_s \bar{d}} \\ \rho_s = 1 - e^{-25C_s \bar{d}} \end{cases}$$

式 7-42

### 7-3-7. 床面照度簡易計算モデルの精度

計算式により導いた予測値と実験値を比較したものが図 7-17 である。黒粒子については相関係数が $R^2=0.91274$ と非常に高く、予測式が十分説明できることを示している。白粒子については実験値に比べ予測値の方が高い結果が基準化照度 $E/L>0.1$ の条件で多く見られるが、その相関係数は $R^2=0.77059$ と比較的高く、概ね説明できていると考えられる。

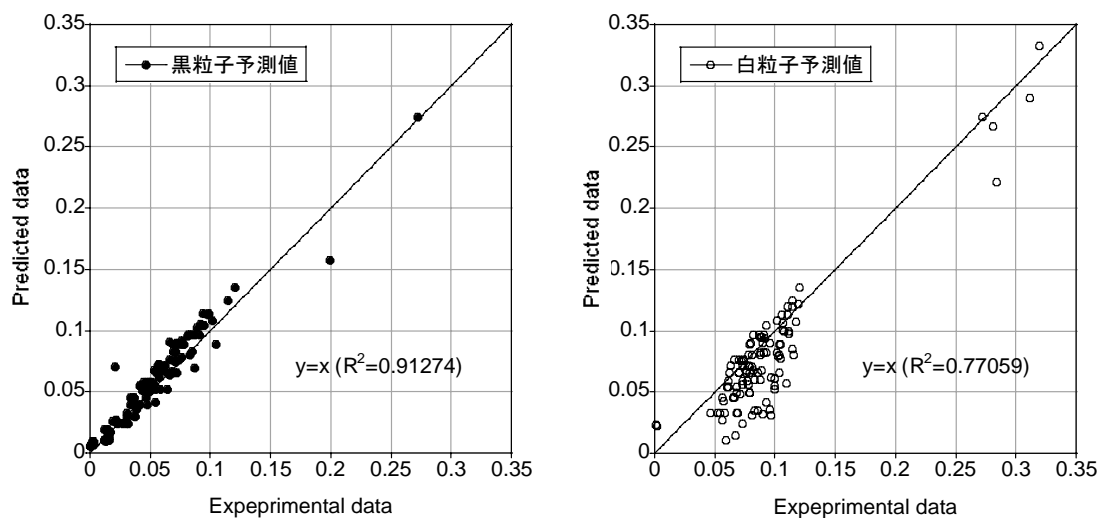


図 7-17 基準化照度の予測値と実験値の比較

白粒子の結果について予測値と実験値がどの条件で大きく異なるか把握するため、条件毎に予測値と実験値を比較し図 7-18 に示す。図中のプロットは煙層高さを表し、同じ煙層高さにおいて光学的濃度が変化するにつれて折れ線でプロットを繋いでおり、プロットのx値およびy値が大きいほど光学的濃度が小さいことを意味している。また図中の直線は実験値=予測値、波線は $0.8<\text{予測値}/\text{実験値}<1.2$ の範囲を示している。図より、実験値に比べて予測値がずれるのは、煙層高さが2[m]・光学的濃度が1[1/m]などの、想定空間に対して煙粒子が多く存在する状態に見られる傾向がある。煙の中の光の吸収について、本研究ではLambert-Beerの法則を基本に取り扱っているが、これは濃度が薄い層で成立する近似式である<sup>21)</sup>。すなわち、今回の床面照度簡易計算モデルについては、有効範囲を示す必要がある。図 7-18 において予測値と実験値が大きくずれている条件は、内装反射率や想定空間の違いよりも $C_s$ と $Z_{smoke}$ の組合せに影響を受けていると考えられる。

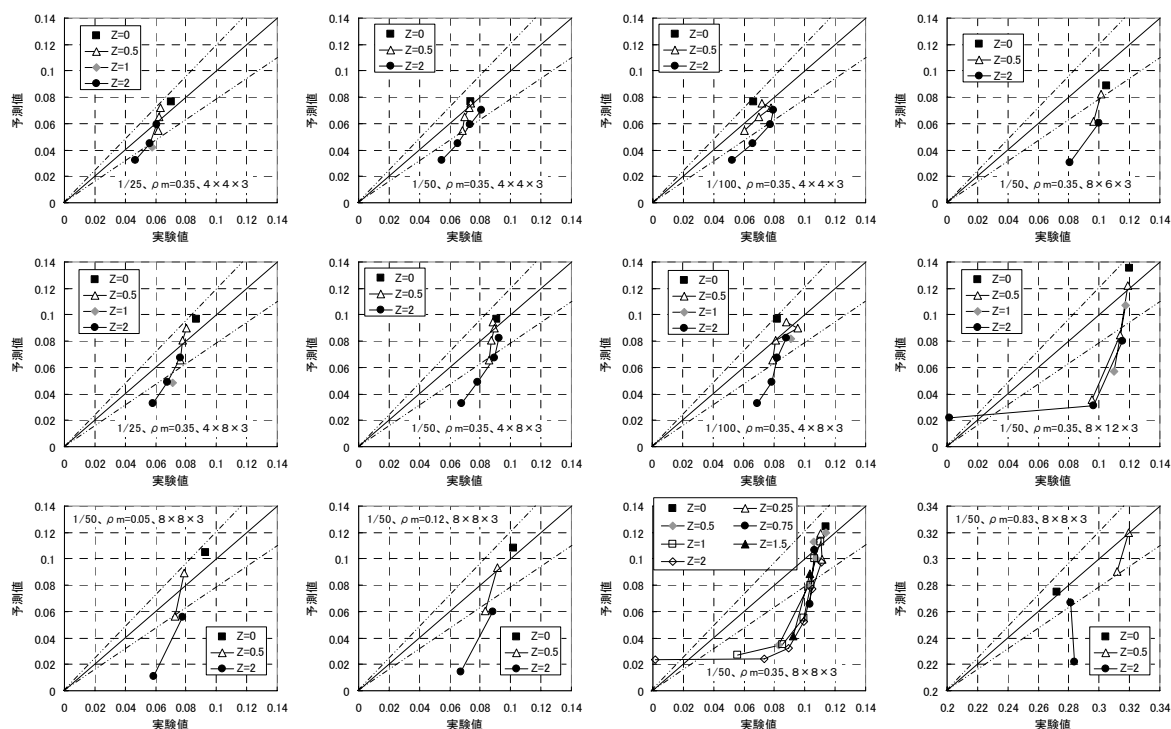


図 7-18 基準化照度の予測値と実験値の比較（白粒子・条件別）

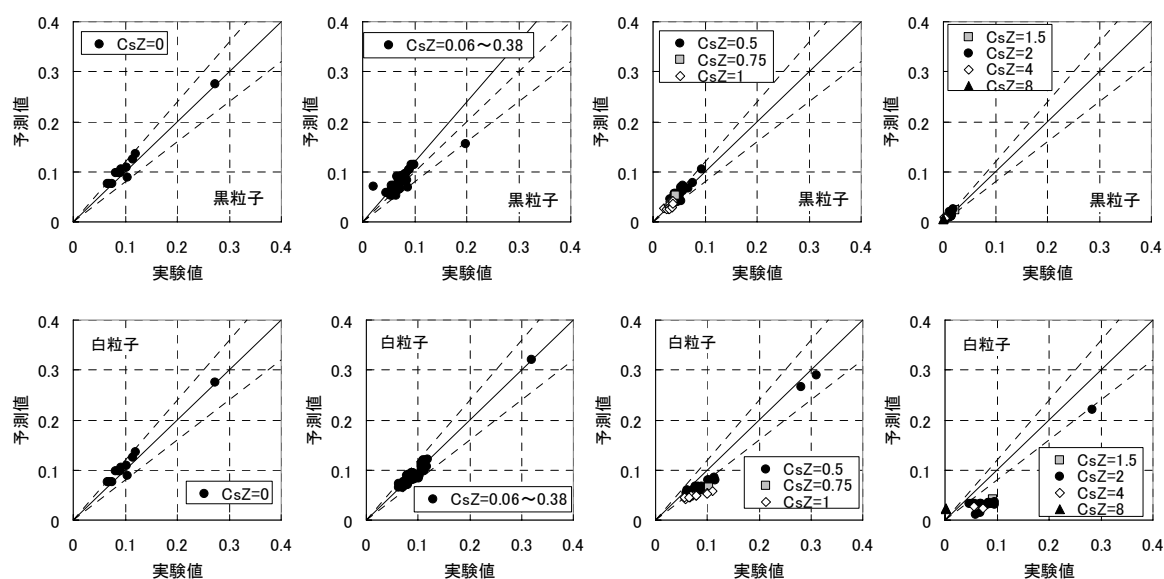


図 7-19 基準化照度の予測値と実験値の比較（CsZ 別：上段＝黒粒子、下段＝白粒子）

そこで前項 7-3-4 で取り扱った  $CsZ_{smoke}$  の範囲に分けて図 7-17 を再表示し、図 7-19 に示す。図 7-19 の上段が黒粒子の結果で、下段が白粒子の結果である。図中の直線は実験値=予測値、波線は  $0.8 < \text{予測値/実験値} < 1.2$  の範囲を示している。

図 7-19 の最左の二図は煙粒子の存在しない結果であり、黒白粒子ともに実験値と予測値はほぼ一致しており、作業面切断法を用いた今回の床面照度簡易計算モデルの精度は十分なものであることを示している。

図 7-19 上段の黒粒子の結果は、 $CsZ_{smoke}$ が大きくなると基準化照度が 0 に近くなり、実験値と予測値はほぼ一致して問題ない。しかし図 7-19 下段の白粒子の結果では、 $CsZ_{smoke}$ が大きくなるにつれて予測値が実験値より過小評価されていることが示されている。黒粒子の結果は問題がないことを考えると、白粒子の散乱成分の取扱いが高濃度の時に不十分であるといえる。しかし白粒子についても  $CsZ_{smoke} < 1$  の条件では実験値と予測値はよく一致しており、この範囲で計算モデルは有効と考えられる。

区画火災の進展過程は大きく 4 つのステージ：くん焼期・初期拡大期・火盛り期・減衰期に分けられる<sup>22)</sup>。白煙はくん焼期と減衰期の末期に見られるが、火の勢いが小さく光学的濃度も高くない状態にあり、火災現象の殆どにおいて黒煙が発生していると考えられる。前出の結果と合わせて考察すると、今回構築した床面照度簡易計算モデルは火災現象における視環境を予測する上では十分有益であると考えられる。

図 7-19 では白煙の間接照度の予測が不十分であったことが推測できる。しかし今回の実験では直接照度と間接照度とを加算した全照度を測定しているので、間接照度がどの程度全体に寄与しているか評価することができない。そこで床面照度簡易計算モデルの予測値における全照度と間接照度を比較し図 7-20 に示す。図の横軸は予測値の基準化照度  $E/L$  であり、縦軸はそれに対する間接照度の比率を示している。最左図は黒粒子と白粒子の全結果を示しており、白粒子の方が黒粒子よりも間接照度/全照度の比率が高いが、いずれの粒子も比率で 0 ～ 1 まで分布している。白粒子の結果では、 $CsZ_{smoke} < 1$  の結果の殆どは間接照度/全照度の比率が 0.4 以下であり、 $CsZ_{smoke}$ が大きくなるとこの比率も大きくなる傾向が見られる。この間接照度成分の精度を上げることが今後の研究課題である。

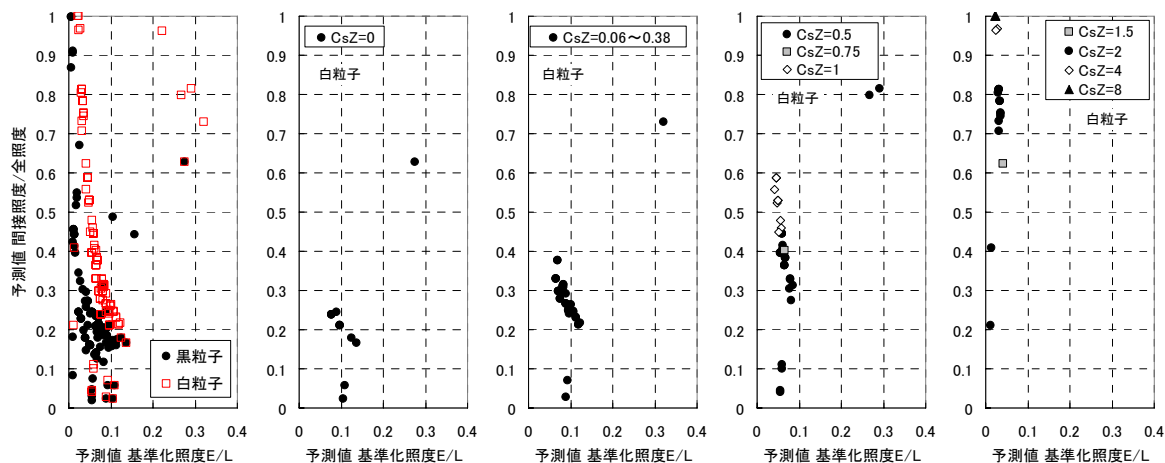


図 7-20 全照度における間接照度の比率（最左：黒白粒子の比較、残りは白粒子の結果）

#### 7-4. まとめ

本章では既往の逐点法と作業面切断法を用いて火災時の避難経路の床面照度簡易計算モデルを提案し、そのモデルの中で煙層の吸収散乱現象を代用する仮想膜の透過率と反射率を水溶液実験結果に基づいて抽出した（式の記号は図 7-5 と図 7-6 を参照）。

$$E' = E_d' + E_{rs}'$$

$$E_d' = \sum_i E_{d\_i}' / i = \left\{ \sum_i \left( 1 - \int_t \eta C_s dt \right) L_0 \cdot e^{-C_s r_i} \int_s \frac{(\cos \theta)^2}{R_i^2} dS \right\} / i$$

$$E_{rs}' = \frac{(F_{(1)1} + F_{(2)1}' + A E_{ra(2)}') \rho_{m(1)} (1 - A/S_{(1)})}{A \rho_{m(1)} + S_{(1)} (1 - \rho_{m(1)})}$$

$$F_{(2)1}' = \sum_i F_{(2)1\_i} \cdot e^{-C_s r_i} + k \left( \sum_i F_{(2)1\_i} - \sum_i F_{(2)1\_i} \cdot e^{-C_s r_i} \right)$$

$$E_{ra(2)}' = \frac{\{ (F_{(1)1} + F_{(2)1}') \rho_{e(1)} + (F_{(1)2} + F_{(2)2}') \} \rho_{e(2)}'}{A (1 - \rho_{e(1)} \rho_{e(2)}')}$$

$$F_{(2)2}' = F_{(2)2}$$

$$\rho_{e(1)} = \frac{A \rho_{m(1)}}{S_{(1)} - (S_{(1)} - A) \rho_{m(1)}}$$

$$\rho_{e(2)}' = \rho_s + \frac{A \rho_{m(2)}' \tau_s^2}{S_{(2)} - \rho_{m(2)}' (S_{(2)} - A + A \rho_s')}$$

$$\rho_{m(2)}' = \rho_{m(2)} - (\rho_{m(2)} - \rho_{smoke}) \int_t \eta C_s dt$$

$$\tau_s = \begin{cases} e^{-25 C_s \bar{d}} (\text{くん焼煙} \cdot \text{白煙}) \\ e^{-5 C_s \bar{d}} (\text{有炎燃焼煙} \cdot \text{黒煙}) \end{cases}$$

$$\rho_s = \begin{cases} 1 - e^{-25 C_s \bar{d}} (\text{くん焼煙} \cdot \text{白煙}) \\ 0 (\text{有炎燃焼煙} \cdot \text{黒煙}) \end{cases}$$

白煙においては、 $C_s Z_{smoke} < 1$  の適用範囲があるが、火災現象の多くでは黒煙が発生しているので、今回構築した床面照度簡易計算モデルは火災現象における視環境を予測する上では十分有益であると考えられる。またこの計算モデルにより、今後二層ゾーンモデルを用いて火災煙下の床面照度を計算することができるため、第4章の避難行動予測に連動させることが可能となった。

なおこの計算モデルは状態を安定させやすい水溶液媒質によって求めているので、予測式の精度を高めると共に、今後実際の燃焼煙を用いて検証することが必要である。

注：

- 1) 神は煙の光学的濃度  $C_s[1/m]$  と光の散乱量の関係について様々な火源や燃焼状態について検討し、くん焼煙およびメラミン樹脂の有炎燃焼時（白煙）において散乱係数  $k=1$  であることを示した。これは白い煙の粒子表面の反射率が  $\rho_{smoke}=1.0$  と置き換えて考えることができる。

参考文献：

- 1) 松浦邦男・高橋大次：エース建築環境工学Ⅰ日照・光・音、朝倉書店
- 2) 松浦邦男：作業面の等価反射率、日本建築学会論文報告集、Vol.54、pp.509-512、1956
- 3) 松浦邦男・金會瑞：直射日光を受けるベネチアンブラインドによる室内照度の実験的研究：その3、作業面間接照度分布の測定とその性状、日本建築学会学術講演梗概集・計画系、(57)、pp.11-12、1982
- 4) 松浦邦男・小西弘高：前面建物をもつ側窓採光室の作業面間接照度の性状、日本建築学会学術講演梗概集・D 環境工学、pp.599-600、1986
- 5) 松浦邦男・小西弘高：側窓室の間接照度の性状と作業面の簡易計算式の精度、日本建築学会近畿支部研究報告集・計画系、(26)、pp.53-56、1986
- 6) 松浦邦男・小西弘高：フレネル型正反射成分を含む天井面を有する片側採光室の作業面間接照度、日本建築学会学術講演梗概集・D 環境工学、pp.489-490、1987
- 7) 松浦邦男：建築照明、共立出版株式会社、1971
- 8) 松浦邦男：作業面の等価反射率（第2報）、日本建築学会論文報告集、Vol.57、pp.225-228、1957
- 9) D. E. Spencer：The Effect of Furniture on the Coefficient of Utilization, Ill. Eng., Vol. 52、No.1、pp.35-42、1957
- 10) 宿谷昌則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学、丸善株式会社、1993
- 11) 信田真一郎・佐藤隆二：机が配置された室の作業面照度の予測法に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集・環境系、pp.253-256、1999
- 12) 信田真一郎・佐藤隆二：机の存在する室の作業面の等価反射率に関する実験的検討、日本建築学会学術講演梗概集・D 環境工学、pp.309-310、1997
- 13) Yuki AKIZUKI, Takeyoshi TANAKA, Hidekazu SUZUKI and Tsuneto TSUCHIHASHI: Calculation Method for Visibility of Emergency Sign in Fire taking into account of Smoke Adhesion, Fire Safety Science - Proceedings of the 8th International Symposium, pp.1093-1105, 2005
- 14) Yuki AKIZUKI and Naoya HARA, Model Equation for Downward Equivalent Reflectance of Interface of Smoke Layer, Proceedings of 6th Lux Pacifica, pp.141-144, 2009

- 15) Yuki AKIZUKI Naoya HARA and Takeyoshi TANAKA 、 Simplified calculating Model of Floor Illuminance in Fire Smoke、Proceedings of the 5th International Building Physics Conference 2012 Kyoto (審査中)
- 16) 神忠久：煙中の誘導標識の見越し距離について（１）、日本建築学会論文報告集、Vol.182, pp.21-29、1971
- 17) 秋月有紀・原直也：煙層下の床面照度算出式の構築に関する研究 その１ 光学的濃度の縮率の取り扱い、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.459-460、2010
- 18) 田中晔義：改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、2002
- 17) 日本火災学会編：火災と建築、共立出版株式会社、2002
- 20) C. L. Tien, K. Y. Lee and A. J. Stretton : Radiation Heat Transfer、SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE、Chapter 4、pp.73-89、2003
- 21) 杉本彰：科学をとらえ直す-多面的なものの見方と考え方、裳華房、2000
- 22) 原田和典：建築火災のメカニズムと火災安全設計、日本建築センター、2007





## 第8章 二層ゾーンモデルを用いた火災時避難経路での避難行動予測

### 8-1. はじめに

都市に人口が集積するに伴い、地下利用の用途と量も増大する傾向があり、実質的な都市化の進展状況を示す指標である国勢調査の人口集中地区人口（DID人口）が100万人を超えると地下街や鉄道部の地下部が出現してくると言われている<sup>1)</sup>。都市の地下利用は、経済成長や都市化の進展に伴い進むものであり、利用密度が高密化するだけでなく、施設の種類および規模も増加する。この状況を踏まえて、都市計画中央審議会では平成元年2月10日に「地下における都市計画のあり方について」、同年9月18日に建設省では「地下の公共的利用の基本計画の策定などの推進」の通達が出され、以後、都市における地下利用を計画的に進められるようになってきている。

戦後の日本において急速に発達した地下利用の一形態に「地下街」がある<sup>1)</sup>。これは公共歩道や広場、地下駐車場などを中心に、店舗や各種サービス施設等を包含する施設として捉えられた、公共公益施設の収容空間としての機能を有したものである一方、地下街は閉鎖的な空間となることから防災設備等を重装備する必要がある。地下街は大きく「道路下型」と「駅前広場下型」に分けられるが、近年では道路下の地下鉄整備にあわせてターミナル部に地下街を計画するケースが多く、1995年には地下鉄営業距離は全国計約500[km]、地下街の総延床面積は約100万[m<sup>2</sup>]にも及んでいる<sup>2)</sup>。

二層ゾーン建物内煙流動モデルに基づく予測計算プログラムBRI2002<sup>3)</sup>は、現在、建築火災安全設計の実務の場で標準ツールとして利用されており、地下街といった複層多室で延べ面積が大きい建築空間における建築火災時の建物内煙流動性状を把握するのに適している。そこで本章ではBRI2002により建物内煙性状を把握し、区画毎に視覚刺激に関連する物性値を抽出した上で、区画の視認性に基づく避難行動を予測する方法について、実際の地下街を事例対象に用いて示す<sup>4)</sup>。

### 8-2. 煙層温度による非常用照明器具の破損の取り扱い

非常用照明器具は停電時に定格時間（通常30分間）点灯し、床面照度1.0[lx]以上確保できるように建物内に設置されているが、その技術基準<sup>5)</sup>では器具周囲温度が140[°C]以下で定格時間有効に非常点灯が継続できることを規格で定めており、それ以上の温度になると保証の限りではない。非常用照明器具や避難誘導灯は天井面に設置されることが多いが、火災時には高温の煙が天井に溜まるため、避難時にこれらの器具が破損して避難経路の視環境が急激に悪化することが予想される。図8-1は第6章6-5で述べた大邱地下鉄火災現場の写真である。高温の火災煙により、避難誘導灯が溶けて破損しており、避難時の手がかりとして役に立たなかったことがわかる。

二層ゾーンモデルでは区画内の煙層温度 $T_{smoke}$ [°C]の経時変動を計算により求めるこ

とができるため、火災煙の熱による器具破損を取り扱うことが可能になる。本章では、区画内の煙層温度が 140[℃]に達した時刻に、その区画の煙に曝された照明器具が破損して光束 0[lm]となるように設定することで、現実の火災時の視環境に近い状況をシミュレーションする。



図 8-1 大邱地下鉄火災事故の火災煙により破損した避難誘導灯

### 8-3. ケーススタディの設定

#### 8-3-1. 京都御池地下街の概要

京都の御池地下街は、地下鉄整備にあわせてターミナル部に地下街を計画した代表的な例の一つとして位置づけられている。地下 1 階に地下街、地下 2 階に駐車場、地下 3 階に地下鉄という地下空間の重層利用が行われており、河原町周辺における駐車場不足の解消と交通混雑の緩和を図るために地下鉄東西線の建設に伴う地下空間の整備の一環として 1997 年に開業した。地下 1 階の地下街には物販・飲食を中心に約 50 店舗が軒を並べており、地下駐車場は京都市駐車場と接続していて併せて都心部最大規模（約 980 台：うち京都御池地下街分は約 300 台）の地下駐車場となっている<sup>6)7)</sup>。概要を表 8-1 に、また図 8-2 に御池地下街（ゼスト御池）のフロアマップ<sup>8)</sup>を示す。

表 8-1 京都御池地下街の概要<sup>6)7)</sup>

建設位置	京都市中京区下本能寺前町 主要地方道二条停車場・東山三条線（御池通：幅員 50m）下	
地域・地区	商業地域、準防火地域（道路下）および路線防火地域、第 6 種高度地区、駐車場整備地区	
主要用途	公共地下歩道、公共地下駐車場、店舗等	
延床面積	32, 688.00[m <sup>2</sup> ]	
	地下街面積（B1F）	12, 931.29[m <sup>2</sup> ]
	地下駐車場面積（B2F）	14, 026.36[m <sup>2</sup> ]
建物規模	地下 3 階	
構造	鉄筋コンクリート構造	

地下街の高さ	地下街標準レベル (B1F)	GL-9.0[m]
	地下駐車場標準レベル (B2F)	GL-13.5[m]
	機械室標準レベル (B3F)	GL-19.1[m]



図 8-2 御池地下街のフロアマップ<sup>8)</sup>

公共地下歩道は河原町通から御幸通までの東西方向に幅員 6.0[m]の歩道 2 本を設けられている。公共地下広場の配置は、防災上の観点から、公共地下歩道の全ての部分からの歩行距離が 50.0[m]以内となる位置に南北方向 4 箇所には設けられている。この広場は東西の地下歩道と交差し、河原町通下広場は幅 22.0[m]、その他 3 箇所の広場は幅 14.0[m]を設け、排煙・採光のための吹抜を設置するとともに地上へ通じる階段も設けている。排煙口は 8 箇所（地下広場 4 箇所×各 2 箇所）を地表階歩道の中に設置している。公共地下広場および公共地下歩道面から地表への階段は 17 箇所設置されており、この中には防災センターの専用階段 1 箇所と御池地下街に隣接する京都ホテルオークラ内の階段 1 箇所を含んでいる。地下駐車場からの直通階段は 2 箇所ある。地下 1 階（地下街）と地下 2 階（駐車場）をつなぐ階段は、全て附室が設けられており、排気ガスが地下街に届かないような配慮がなされている。

地下 1 階東側に地下鉄駅施設が設置されているが、防火区画により地下街側と完全に遮断できる構造となっている。

### 8-3-2. 検討領域

図 8-2 の通り、御池地下街は 4 つの広場で大きく防煙区画が設定されており、歩道や店舗の配置は同じような配置計画がなされている。河原町広場側は地下鉄駅舎と接しているため、緊急時にはシャッターが下りて完全に防火区画で遮断されるようになっているが、御幸町広場側は御池地下駐車場と隣接しており、緊急時にも特に防火区画措置がなされていない。そこで本章での検討領域は、御池地下街西側の御幸町広場から寺町広

場までの区画の地下 2 階（地下駐車場）および地下 2 階から上階へ繋がる階段とする。図 8-3 に検討領域の平面図を示す。検討領域は御池地下街全体の約 1/3 を占めている。図中の青線部分は施工当初の設計図に基づく防火区画及び防煙区画によって計算対象として設定した室を表しており、桃色網部は計算上扱わない部分を意味している。緑色網部の階段は地下 1 階から地上へ続く階段、黄色網部は地下 2 階から地下 1 階へ続く階段、そして橙色網部は地下 2 階から地上までの直通階段を意味する。

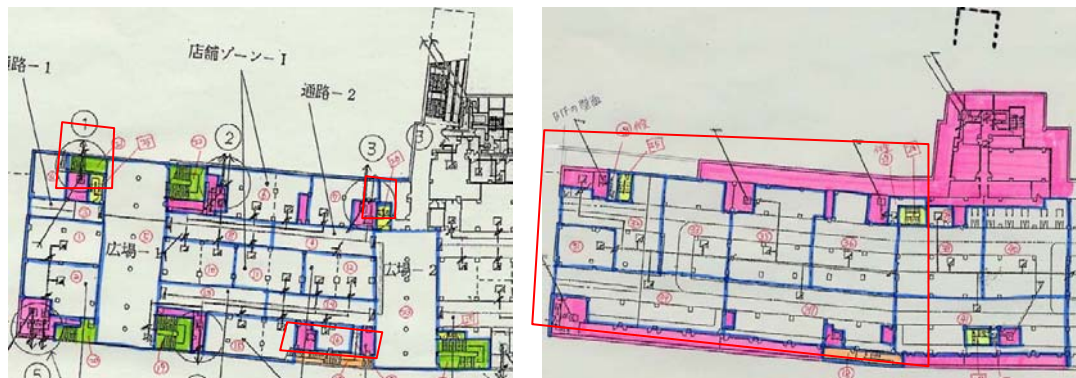


図 8-3 検討箇所 図中の赤領域（左：地下 1 階店舗エリア、右：地下 2 階駐車場エリア）<sup>6)</sup>

### 8-3-3. 煙流動予測計算における設定条件

BRI2002<sup>3)</sup>による二層ゾーン建物内煙流動予測計算を行うにあたり、設定条件を以下のように設けた。

- (1) 施工当初から現在までの間に店舗状況が設計図と異なっているが、今回計算を行うにあたり、施工当初の設計図<sup>6)7)</sup>に示されている防火区画及び防煙区画を基準として計算する室数等を設定する。
- (2) 御池地下駐車場に接している開口部や、検討箇所の東端の開口部（本来は御池地下街が続いている部分）については、そのまま外気として考えると地下空間としての煙流動とは異なるため、奥行き 2.0[m]で地上までの高さ 12.5[m]の筒状の室を両者に設け、地上まで続く階段と同じ条件の開口部を設けて外気と接触させる。
- (3) 地下街の壁面材料は店舗・階段・廊下・広場いずれも大理石とし、地下駐車場の壁面材料はモルタルに設定する。
- (4) 店舗のシャッターは火災室内の感知器が発報後 30 秒後に閉鎖開始する。
- (5) シャッター及び非常口が閉鎖された状態での有効開口比は共に 0.01 とする。
- (6) 各防火区画に設置されている排煙口の定格排煙量は、防火区画容積に応じて一律になるように設定する（単位容積あたりの定格排煙量 0.002[m<sup>3</sup>/s]）。
- (7) 階段の地上開口部はいずれも常時開放されているものとして取り扱う。
- (8) 地下駐車場に続く階段の附室の扉はいずれも非常口と同等の条件に設定する。
- (9) 煙流動予測計算の計算時間間隔は 1.0[s]、最小層厚の天井高さに対する割合は 0.01、計算の収束条件は 0.01 に設定する。



- (10) 給気口は特に設定しない。
- (11) 外気条件は温度 20[℃]、相対湿度 50[%]、外部風の基準風速は 0.1[m/s]、基準高さ 10[m]、ベキ乗数は 0.33 に設定する。
- (12) 煙の光学的濃度算出のための吸収断面積  $\gamma_{sl}$  は 210[m<sup>2</sup>/kg] に設定する。

今回検討対象とした御池地下街は、昭和 55 年に出された 5 省庁通達「地下街の取り扱いについて」ならびに地下街中央連絡協議会で定めた「地下街に関する基本方針について」に基づく行政の基本的指針（都市計画法、道路法、建築基準法、消防法、ガス事業法）<sup>2)</sup> に添って厳しい審査基準をクリアした物件であるため、基本的に火災時の煙が伝播しないような工夫が随所に見られている。そこで今回は、現状に対して防煙区画が適切に設定されていなかった場合を想定し、実際の図面を一部変更等した事例を作成して事例検証を行う。

#### 8-3-4. 火源および避難経路の設定

地下駐車場で車両火災<sup>9)</sup> が図 8-4 のRoom7 の位置で発生した場合を想定した。また避難経路はRoom7（火災室）→Room6（火災室隣室）→Room2→Room4（上階の地下街への階段附室）に設定した。

車両火災は自動車の登録台数の増加とともに年々増加しており、平成 5 年には 6478 件発生したが、その内の約 27[%]は放火（放火の疑いを含む）によるものであり、駐車場を所有する地下街の防火対策として考える必要がある火災の一つである。最近の自動車はコストダウン及び性能向上に伴う軽量化が進み、合成樹脂類が部材に多く使われるようになってきている。日本建築学会・防火委員会・火災安全設計小委員会の局所火災に対する耐火設計WGでは、様々な可燃物単体の燃焼特性についてデータベースを作成しており、乗用車（セダン）1 台の発熱速度は約 3000[kW]であることを明らかにしている<sup>10)</sup>。その結果を参考にして、本検討で計算に用いる火源を図 8-5 のように設定した。



図 8-4 出火地点と避難経路

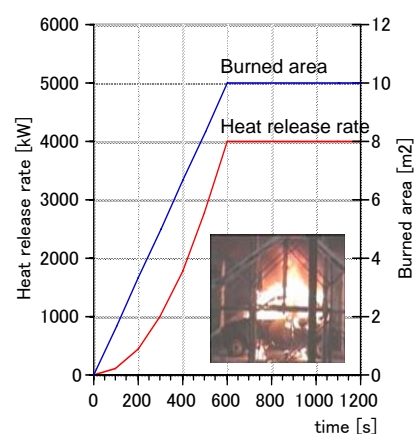


図 8-5 火源の発熱速度と燃焼面積

### 8-3-5. 区画内床面照度計算における設定条件

火災前の初期の内装反射率および照明器具条件は、実際の御池地下駐車場の状態を用いる。図 8-6 に検討領域の概観を示す。車路の天井面および床面の反射率は 0.32 であり、車路のアスファルト舗装した床面の反射率は 0.04 である。天井に設置された照明器具は 32W 直管 1 灯の富士型蛍光灯で、1 灯当たりの光束は通常時 3200[lm] で非常時 1600[lm] である。これらの条件と第 7 章の床面照度簡易計算法を用いて、避難経路の各区画の床面照度を計算する。なお車両火災で発生する煙は黒煙とし、煙粒子の付着係数は灯油と同じ  $\eta=0.0007[\text{m/s}]$ 、光学的濃度における散乱成分は  $k=0.5$ 、粒子の反射率  $\rho_{\text{smoke}}=0.1$  とする。

前述の通り、非常用照明器具は停電時に定格時間床面照度が 1.0lx 以上確保できるように設定されているが、周囲温度が 140℃ で有効に非常点灯が継続できることを規格で定めており、それ以上の高温の火災煙に曝された場合は保障されていない。そこで本章での床面照度の計算においては、BRI2002 二層ゾーンモデル<sup>3)</sup>によって計算された同時刻の煙層温度と関連させ、区画内に設置された非常用照明器具が煙層温度 140℃ 以上に曝された時点で器具が破損することにし、光束 0[lm] になるように設定する。なお、出火前は照明器具は通常の点灯状態とし、出火直後に非常時モードの点灯に切り替わることとした。



図 8-6 御池地下駐車場の概観（右写真右壁面にある開口部は Room4 への入口）

## 8-4. 火災時の煙の性状と避難経路の床面照度<sup>4)11)</sup>

### 8-4-1. 検討領域の煙の分布

図 8-7 に検討領域における煙層温度と光学的濃度の分布を示す。計算結果は着火後 120,300,600,1200 秒後であり、平面図では天井付近（煙層が存在する高さ）での状態、断面図では煙層温度・光学的濃度と共に、その時間における煙層高さも示している。火災室 Room7 で発生した煙は、時間の経過と共に隣室 Room6、Room2、そして地下 1 階の地下街へと繋ぐ階段附室 Room4 へ流れていることが示されている。この階段附室 Room4 は上階へ避難するための重要な避難経路である。

### 8-4-2. 避難経路の煙性状と床面照度

BIR2002 を用いて計算した避難経路の煙性状を図 8-8 から図 8-10 に、さらにその結

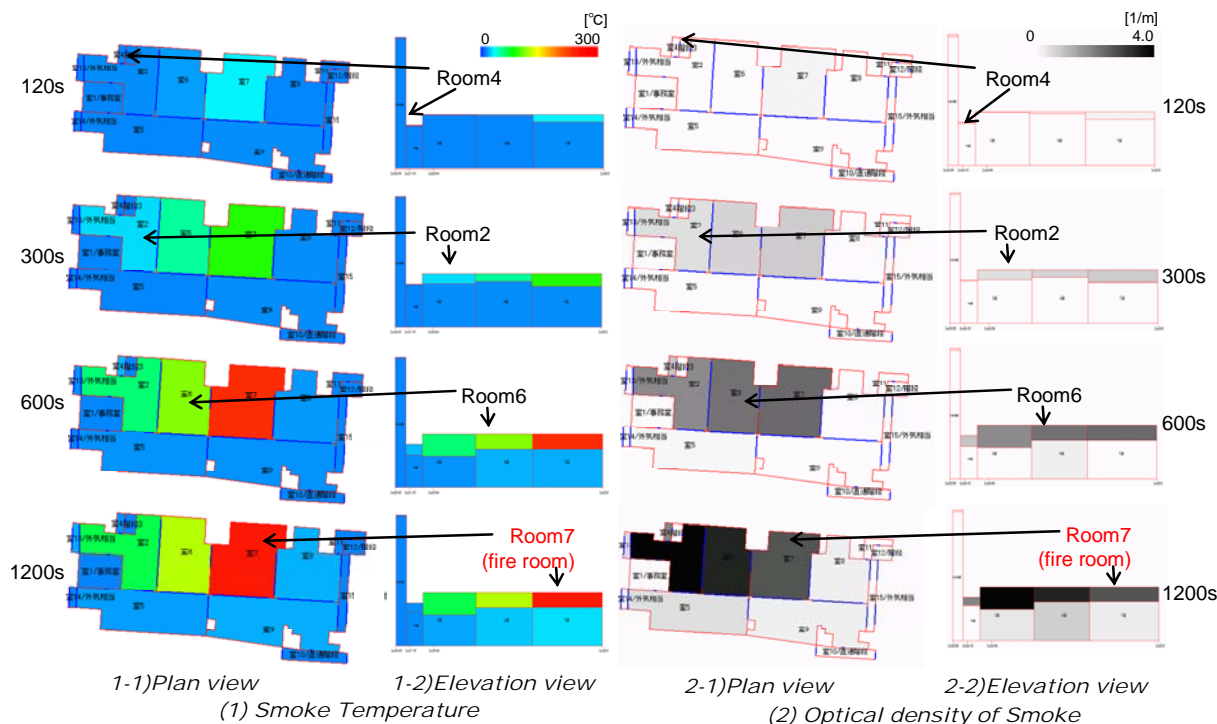


図 8-7 検討領域での煙の分布（左：煙層温度、右：煙の光学的濃度）

果を用いて計算した避難経路の床面照度を図 8-11 に示す。煙層高さ（図 8-8）と光学的濃度（図 8-9）は床面照度の計算において光束の減衰や散乱および煙粒子の付着に関与する。また煙層温度（図 8-10）は照明器具の破損に関与しており、火災室では着火から約 400 秒後に煙層温度が 140 度に達するため非常用照明器具が破損して暗闇になることが図 8-11 に示されている。また他の室において、煙の流入に伴い床面照度が低下し、非常用照明として確保しなければならない 1.0[lx]以下になることも示されている。

天井面にだけ非常用照明器具を設置すると、居室避難が完了する前に煙により視環境が悪化してしまい避難遅れを招く危険があることを意味しており、火災に対して安全な避難経路を設計するためには、床面や壁面下部にも非常用照明器具や避難誘導灯を設置する必要があるといえる。

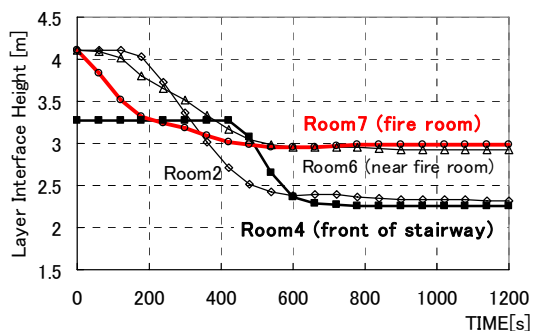


図 8-8 煙層高さ

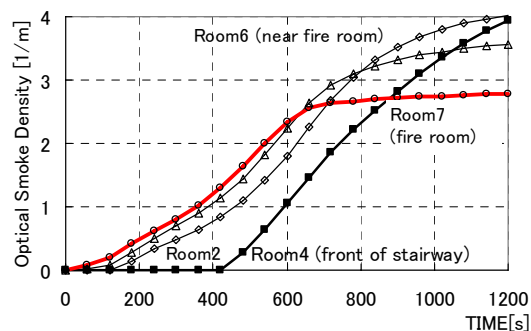


図 8-9 煙の光学的濃度



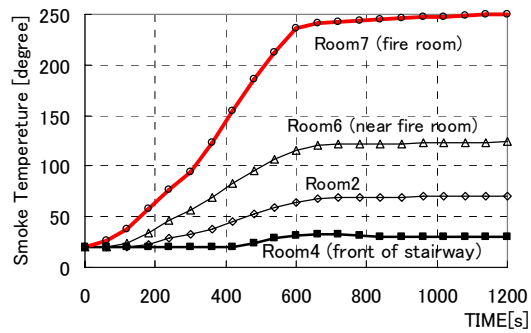


図 8-10 煙層温度

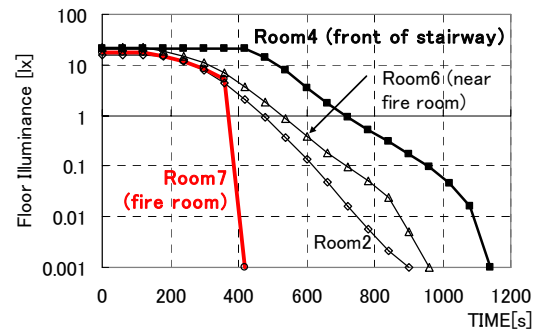


図 8-11 床面照度

## 8-5. 避難経路における歩行速度と心理状態<sup>4)</sup>

### 8-5-1. 青年の避難行動

各区画の火災煙流動に伴う床面照度結果（図 8-11）と第 4 章で構築した避難行動予測モデル<sup>12)</sup>を用いて、避難経路における青年の視力とそれに基づいて算出された歩行速度および心理状態について求め、図 8-12 から図 8-16 に示す。

視力（図 8-12）は避難経路の煙性状に伴う床面照度によって計算されている。対象空間が地下駐車場であり路面や壁面の初期反射率が非常に低く（0.047）、その結果、火災前の初期視力も低い値となっている。火災室 Room7 での視力は着火 420 秒後に 0.01 以下で視認できなくなる。隣接する Room6 や Room2 も火災室と同様の傾向を示しており、着火約 9 分後には視力が 0.01 以下となる。階段附室の Room4 は塗装により内装反射率が高く、そのためその空間での視力も高い。しかし煙が入り、床面照度が低くなるにつれて、視力も急激に低下し、着火約 1000 秒後に 0.01 以下となる。図 8-10 は火災時には例え停電にならなくても、光源への煙粒子の付着や煙層内での光束の減衰によって視認性が悪化することを示している。

視認性の低下は歩行速度や心理状態へ直接影響する。図 8-13 は歩行速度の経時変化を示しており、どの部屋でも視力の低下と合わせて歩行速度も低下する。主観評価の結果でも、視力と歩行速度の低下に合わせて否定的な評価の割合が 1 に近づき、見難く・歩き難く・不安に感じるようになり、火災室に近く煙により視認性が悪い環境ほどそれが早い時期に生じる（図 8-14～図 8-16）。図 8-14 では火災前の時に既に見難さに関する

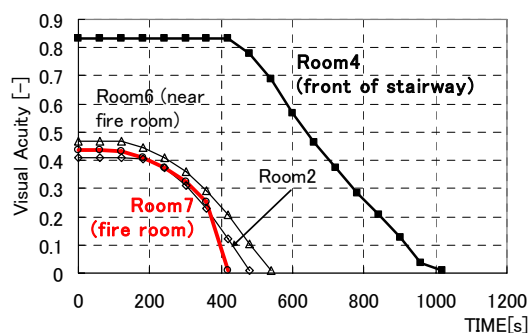


図 8-12 避難経路での視力(青年)

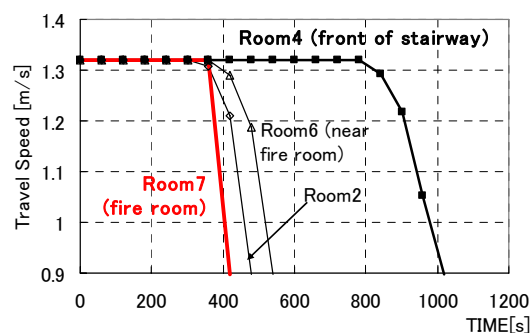


図 8-13 歩行速度(青年)

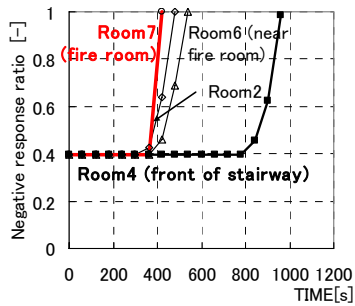


図 8-14 避難経路の見難さ(青年)

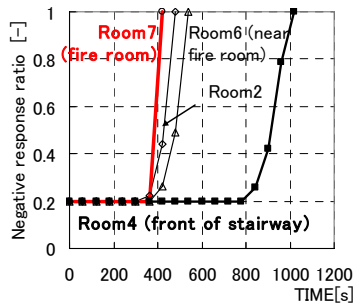


図 8-15 歩き難さ(青年)

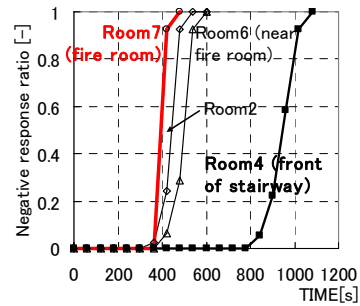


図 8-16 不安感(青年)

る否定的評価割合が 0.4（青年の 4 割が見難いと感じる）を示しており、駐車場に該当する空間（Room2、Room6 および Room7）は前述図 8-11 に示されたように火災前の床面照度が約 20lx とそもそも低く、十分な視認性でなかったことも表現されていた。

### 8-5-2. 避難行動における年齢層の比較

階段附室Room4における青年と高齢者の避難行動の比較を図 8-17 から図 8-21 に示す。同じ避難経路であっても高齢者の方が視力が低く（図 8-17）そのため青年より早い時期に歩行速度や心理評価が低下する。群集避難において高齢者が混在すると歩行速度が遅くなるという知見<sup>13)</sup>があるが、今回の結果で示された青年よりも早期に避難行動が停滞することが影響したとも考えられる。

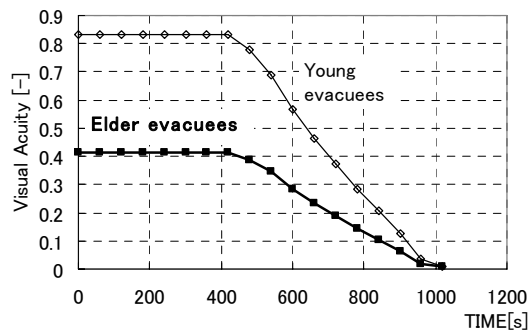


図 8-17 避難経路での視力(年齢層比較・Room4)

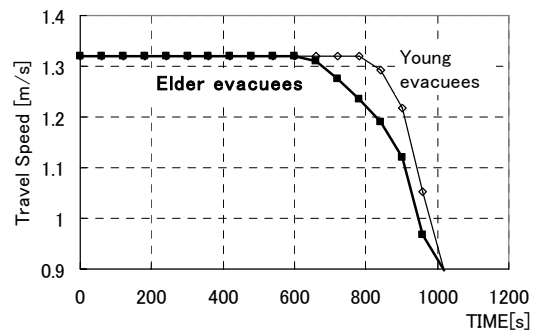


図 8-18 歩行速度(年齢層比較 R4)

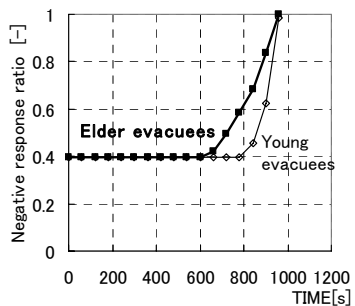


図 8-19 避難経路の見難さ(R4)

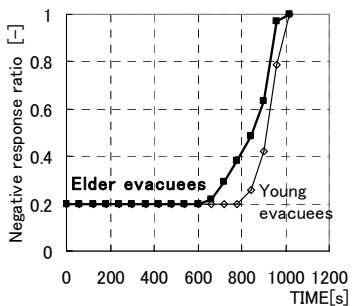


図 8-20 歩き難さ(R4)

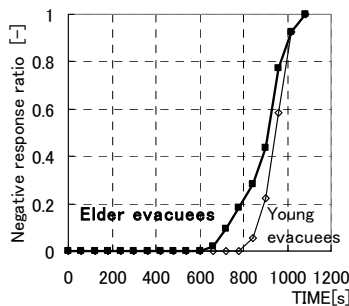


図 8-21 不安感(年齢層比較 R4)

図

## 8-6. 避難誘導灯の輝度変化

階段附室（Room4）に接続するRoom2には、Room4との開口部上部（ $H=2.0\text{m}$ ）に避難口誘導灯B級BL型（縦 $207\times$ 横 $270[\text{mm}]$ ・白パネル部輝度 $600[\text{cd}/\text{m}^2]$ ・非常時誘導灯専用冷陰極蛍光灯1灯）が設置されている。火災発生から $1200[\text{s}]$ までの間は、前出図8-8に示されたように煙層高さは約 $2.3\text{m}$ までしか降下しないので、この避難口誘導灯は煙に曝されずに初期輝度を維持できる。

火災室Room7とRoom2の間にある区画Room6には、 $H=3.5\text{m}$ の位置に通路誘導灯B級BL型（縦 $207\times$ 横 $270[\text{mm}]$ ・白パネル部輝度 $600[\text{cd}/\text{m}^2]$ ・非常時誘導灯専用冷陰極蛍光灯2灯）が設置されている。この通路誘導灯のパネル部の透過率を $0.8$ 、反射率を $0.7$ とした場合、白パネル部輝度は煙の付着に伴い図8-22のように変化する。避難者の位置によって通路誘導灯との距離が定まり、煙層を通過する距離が求まるので、避難者の眼に到達する輝度はその通過距離に応じてさらに減衰する。火災室の隣室は濃度の濃い煙が天井面に存在するので、照明器具が破損する煙層温度に達しなくても煙粒子の付着により誘導灯が役に立たなくなる状態が示されている。やはり区画の上方だけでなく下方にも避難誘導灯が必要であることが明らかになった。

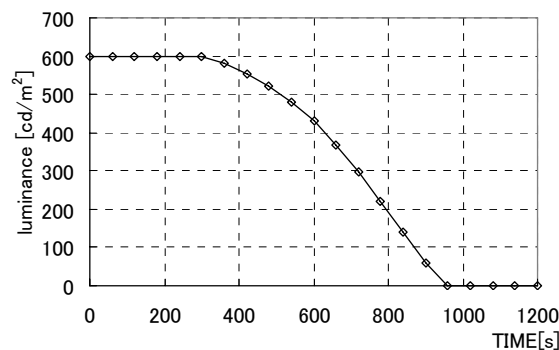


図 8-22 火災室隣室（Room6）に設置された通路誘導灯のパネル部輝度の変化

## 8-7. まとめ

本章では京都御池地下街をケーススタディの対象として、二層ゾーンモデルを用いた火災時避難経路での避難行動の予測方法について示した。BRI2002により建物内煙性状を把握し、区画毎に視覚刺激に関連する物性値を抽出した上で床面照度を算出し視認性に基づく歩行速度や心理状態を把握したり、区画内の避難誘導灯の輝度変化を把握したりすることができるこの手法は、避難経路の視環境設計が適切に行われているか評価するツールに成り得ると考える。

### 参考文献：

- 1) 地下都市計画研究会(編)、建設省住宅局建築指導課(監)：地下空間の計画と整備―地下都市計画の実現を目指して―、大成出版会、1994
- 2) 松尾稔、林良嗣：都市の地下空間―開発・利用の技術と制度、鹿島出版会、1998

- 3) 社団法人建築研究振興協会：BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム、2003
- 4) Yuki AKIZUKI、Naoya HARA and Takeyoshi TANAKA：Calculating Method of Evacuee's Behavior based on the Floor Illuminance in Fire Smoke Estimated by Two Layer Zone Model、Proceedings of 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire、pp.301-311、2009
- 5) (社)日本照明器具工業会、非常用照明器具技術指針 JIL5501、2001 改正
- 6) 京都御池地下街株式会社：京都御池地下街設置計画書（詳細協議資料）京都市、1995
- 7) 京都駐車場株式会社：京都御池地下街消防防災システム性能評価申請書 動的避難誘導システム、1991
- 8) ゼスト御池 HP、<http://zestoiike.com/?cat=3&pagetype=floor> (accessed 2011-11-14)
- 9) 日本火災学会編：火災便覧第 3 版、共立出版、1997
- 10) 局所火災に対する耐火設計 WG：局所火災に対する耐火設計を考える 魅力ある耐火設計に向けて、(社)日本建築学会シンポジウム資料、2005
- 11) 秋月有紀・金井良智・田中哮義・原直也・野口太郎、火災時の避難経路の視環境の表現 避難安全検証の GUI 利用に関する研究（その 2）、日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2、pp.193-194、2006 年 9 月
- 12) Yuki Akizuki、Takeyoshi Tanaka and Kohei Yamao：Calculation model for travel speed and psychological state in escape routes considering luminous condition、smoke density and evacuee's visual acuity、Fire Safety Science -Proceedings of the 9th International Symposium、pp.365-376、2008
- 13) Hao Lu、渡邊翼、北澤知大、土屋伸一、長谷見雄二：群集避難行動における高齢者・身体障害者の影響（その 13）高齢者混在群集の居室避難における行動特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.47-48、2008



## 第9章 総括

### 9-1. 本研究の成果

本研究は、災害時に円滑な避難行動が行えるために視認性に基づく避難経路の設計手法を確立することを目的とし、想定する災害を火災と一般災害（火災以外）に分けて、避難経路の適切な設計について検討した。以下、各章で得られた結論をまとめる。

第1章では、研究の背景および既往の関連研究と残された課題について列挙した上で、研究の目的および論文の構成について述べた。都市や建築空間が大規模・複雑化している現在において、災害時だけでなく日常の場面でも経路探索し易いサイン整備は重要な課題であるが、既往の知見だけでは、具体的なサイン設計へ適応するのが困難であることを示した。また避難行動と避難経路の照明状態の関係について、既往の知見では被験者の視認能力の違いが考慮されておらず、順応の変化も含めた歩行速度の予測式および適用範囲を明示することが必要であることを示した。さらに火災煙の視認性評価を行うにあたり、煙粒子の付着を取り扱う必要があることを示した上で、建築安全設計で広く利用されている二層ゾーンモデルを用いて、火災時の煙流動に伴う室内の床面照度を求め、その環境下での避難行動を予測するモデルの必要性を示した。

第一部では、一般災害時など煙の存在しない非火災環境下において、建築・都市空間における避難経路の視環境設計について、第2章と第3章で検討した。

第2章では、サイン配置計画の避難経路探索のし易さを、避難経路を通る避難者の視野における各種サインの立体角を用いて評価する方法について検討し、探索し易さの評価式をサインの立体角の関数として求めている。これにより、避難誘導標識の立体角の大きさが避難経路探索に寄与する一方で、広告等の避難経路探索のノイズとなるサインの立体角や、視野内に存在するサインの立体角の合計が大きくなるほど、経路探索のし易さが損なわれることが評価可能となる。また、避難経路を指し示すためのサインである避難口誘導灯や通路誘導灯が避難経路上の視野内に占める立体角は非常に小さい反面、広告サインの立体角が占める割合は非常に大きく、避難誘導面の観点からは改善が望まれる状況であることが明らかにした。

第3章では、建築屋内外の避難誘導サインの整備の現状と課題について分析している。建築内部空間については、第2章で得られた評価式を適用して、不特定多数の国内外旅行者が利用する各国の国際空港ターミナルや地下鉄駅舎を対象として検討し、西欧圏に比較し、アジア圏の国際空港ターミナルや駅舎では、広告等のサイン量が多すぎるため、避難経路探索上の負荷になっていることを示した。屋外空間については、多くの観光客

が訪れる京都市東山区を対象として検討し、屋外に設置されている京都市東山区の広域避難場所への誘導標識は、夜間や広域停電などが考えられるときには十分な視認性が確保出来ないこと、および関連部局ごとに異なったデザインで設置されているサインは配置計画の調整が課題であることを明らかにした。

第二部では、煙の存在する火災環境下における避難経路の視環境設計について、第4章から第8章にかけて検討した。

第4章では、煙による空間照度低下や急激な順応変化など、火災時に想定される視環境条件における歩行実験を行い、歩行速度は年齢に関係なく歩行空間の照度の下での歩行者の視力のみによって定まることを明らかにした。また歩行空間での歩行者の視力が0.25以下になると歩行速度は低下すること、照明が十分であっても煙の存在によって歩行速度は低下すること、歩行速度と共に心理状態も同様に歩行空間での歩行者の視力で予測できることを示した。そして、この実験結果を用いて、火災の煙により照度が低下した環境下における避難行動を予測するモデルを構築した。

第5章では、火災の煙が照明光源や区画内壁面等に付着することによる視野輝度の低下を予測するため、火災時の区画火災において、煙に暴露された時間とその煙の光学的濃度から、煙粒子の付着量を予測するモデルを構築した。代表的な火源3種類について付着係数を求めており、くん焼燃焼や有炎燃焼時の煙粒子の付着とそれに伴う光源輝度等の減衰を予測可能とした。

第6章では、光透過の基礎式に対して煙付着の影響を加味し、火災時の煙層形成条件下における視対象輝度予測モデルを構築し、実大空間実験による測定結果と比較することによってモデルの妥当性を確認した上で、それを導入して避難空間における煙層厚さの増加に伴う避難誘導標識の視認性の変化を経時的に予測するモデルを構築した。また、一般事務室を対象にして、避難者から見たときの避難誘導標識の視認性が煙層の降下に伴う煙に付着と光に吸収によって低下してゆく様子をビジュアルに表現する手法を示し、さらに韓国大邱での地下鉄火災における車両内サインの視認性を評価した。

第7章では、建築物の火災安全設計においては火災時の煙層厚さと光学的煙濃度が、通常二層ゾーン煙流動モデルによって予測されることを考慮し、既往の逐点法および作業面切断法を応用して、火災時の空間上部に煙層が形成される二層環境下の床面照度を予測する簡易計算法を構築した。また、水溶液を用いた模型実験による測定結果と比較することによって、その妥当性を検証している。この簡易計算モデルは、火災時の煙が黒煙である場合には煙濃度によらず精度の高い予測を与えるが、白煙の場合には幾分の

適用範囲の限界がある。しかし、火災時の煙は大半の場合に黒煙となるので、この予測モデルは火災時の視環境を予測する実務上の観点からは十分有効である。

第8章では、第4～7章の結果を踏まえて構築された二層ゾーン煙流動モデルと視認性予測モデルの統合モデルを用いて、京都市の地下街駐車場の車両火災を対象としたケーススタディを行い、火災時の煙流動、この下での床面照度、避難者の歩行速度、避難経路の見難さ等の心理状態、避難誘導灯の輝度変化などの予測を行う手法の事例を示した。

第9章は本論文の総括であり、本研究で得られた成果の概要と今後の課題を整理して記述した。

## 9-2. 課題と展望

平成10～12年の建築基準法の性能規定化に伴い、これまで使用材料・構造・設備等の仕様書的基準に留まっていた建築物の防火対策に対して、避難安全設計と耐火設計の一部に性能的基準が導入されてきた。その中では人命安全の確保のための煙に関する許容基準として煙層温度と煙層高さを一定以下に抑えることが定められている。しかし避難有効時間の算出にこれらは関与せず、出口幅・室面積と在館者密度が変数として取り扱われており、煙の流入による視環境の悪化とそれに伴う避難行動の低下に関する内容は含まれていない。避難経路の視認性を性能評価に加えることで、避難者の火災環境におけるポテンシャルを考慮することが可能である。

本研究では、我が国の建築安全設計で広く利用されている二層ゾーンモデルへの適用を視野に入れた、視認性に基づく避難経路の設計方法について検討し、これまでの既往研究で取り扱われてこなかった煙の付着を考慮した煙中の視対象輝度や避難経路の床面照度の簡易計算方法を示した。また避難経路探索における広告を含むサイン設置状況の影響や、広域避難場所への誘導標識の現状の問題点について示し、火災以外の災害時避難にも対応する、日常の都市建築空間の避難環境の整備についても言及した。

本研究で得られた知見は、視環境の悪化により避難困難となる状況を回避するために効果的な避難環境設計を行い、それを評価するためのツールと成り得る。火災の拡大に応じた煙の大量発生に伴うこれら光学的物理量の経時変化を把握すれば、避難者の視覚に基づく避難有効時間の算定等ができ、また建築の設計段階において避難誘導サインの最適設置位置や排煙設備の必要性の評価を行うことが可能になる。

今後は、これらの知見を実務の建築安全設計へ適用するため、以下の課題について検討を加える必要があると考える。

- (1) 第2章で構築したサインの立体角投射率に基づく経路探索し易さの予測式について、様々なサイン設置状態の視野画像に対して十分な評価データに



基づいた予測式の検証を行う。特に分岐点における具体的なサイン設計手法を提示する。またサインの立体角投射率と経路探索時間の関係を抽出し、避難安全検証法の避難完了時間算出にサインの設置状態の影響を加味する。

- (2) 第4章で取り扱った煙の条件は、光学的濃度  $C_s=0.68[1/m]$  であり、避難経路において様々な光学的濃度での歩行速度について検証する。
- (3) 第5章の煙粒子の付着係数について、本研究で取り扱わなかった他の火源材料についても求める。また付着現象における含水量の影響など、そのメカニズムについて検討する。
- (4) 第6章では単純な事務所空間を例に輝度分布の表現を試みたが、実際の避難経路には様々な照明器具が配備されているので、個々の配光に考慮した複雑な輝度分布の表現方法を構築する。
- (5) 第7章で構築した床面照度簡易計算モデルを、水溶液だけでなく煙を散乱媒質とした実験でも適用し、モデルの妥当性を確認する。また簡易計算モデルにおける散乱成分の予測精度を上げる。さらに現在のモデルは二層形成される下部層は空気のみで散乱媒質がない状態を仮定しているが、二層ゾーンモデルでは火災ステージが進むと下部空気層も温度が上昇し煙粒子が存在するので、そのような複雑な状態にも対応できるように改良する。
- (6) 第8章で示した一連の計算方法に必要な照明条件（光源の設置位置・大きさ・光束など）を二層ゾーンモデル **BRI2002** に入力データとしてサブルーチンに組み込み、煙性状の計算結果と同時に各区画の床面照度やその環境下での避難行動の計算結果もプログラム上で容易に求められるように改良する。

## 発表論文一覧

### 【学術論文\_\_審査付】

- 1) 秋月有紀・田中哮義・岩田三千子, 災害時の避難誘導に関する行政管轄下の標識の視認性 ―京都市東山区を対象とした実態調査―, 都市計画論文集, No.39-3, pp.589-594、2004 年 10 月
- 2) Yuki AKIZUKI, Takeyoshi TANAKA, Hidekazu SUZUKI and Tsuneto TSUCHIHASHI, Calculation Method for Visibility of Emergency Sign in Fire Taking into Account of Smoke Adhesion, Fire Safety Science -Proceedings of the 8th International Symposium, pp.1093-1105、2005 年 12 月
- 3) Yuki AKIZUKI, Takeyoshi TANAKA and Kohei YAMAO、Calculation Model for Travel Speed and psychological State in Escape Routes considering Luminous Condition, Smoke Density, and Evacuee's Visual Acuity、Fire Safety Science - Proceedings of the 9th International Symposium、pp.365-376、2008 年 9 月
- 4) 秋月有紀・岩田三千子・奥田紫乃・田中哮義、立体角投射率を用いた避難経路のサイン設置状況の把握 円滑な避難誘導のための視環境計画に関する研究 その 1、日本建築学会環境系論文集、Vol.74、No.641、pp.767-773、2009 年 7 月
- 5) Yuki AKIZUKI, Shino OKUDA, Michico IWATA, and Takeyoshi TANAKA、Evaluation Method for Easy Wayfinding of Escape Routes by Configuration Factor, Study on the Visual Environment Designs for Smooth Evacuation Guidance, No.2、日本建築学会環境系論文集、Vol.77、No.674、頁未定、2012 年 4 月（掲載決定）
- 6) Yuki AKIZUKI Naoya HARA and Takeyoshi TANAKA 、Simplified calculating Model of Floor Illuminance in Fire Smoke 、Proceedings of the 5th International Building Physics Conference 2012 Kyoto（審査中）

### 【論文\_\_国際会議】

- 1) Yuki AKIZUKI and Takeyoshi TANAKA、Visibility of Text Information Functioning as Urban Disaster Prevention: The Visibility of Emergency Signs in the Daegu Subway Fire , Korea 、Proceedings of 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology、pp.579-590、2004 年 3 月
- 2) Yuki AKIZUKI ・ Hidekazu SUZUKI ・ Takeyoshi TANAKA ・ Tsuneto TSUCHIHASHI, Study on the Visibility of Emergency Sign in Fire Smoke :

Part 1 Calculation Model of Target Luminance in the Evacuee's View Taking into Account of Smoke Particles' Adhesion, Proceedings of 5th Lux Pacifica, pp.41-46、2005 年 7 月

- 3) Hidekazu SUZUKI・Yuki AKIZUKI・Takeyoshi TANAKA, Study on the Visibility of Emergency Sign in Fire Smoke: Part 2 Calculation Model for Luminance Distribution in Fire at a Smoke Filling Stage, Proceedings of 5th Lux Pacifica、pp.47-52、2005 年 7 月
- 4) Yuki AKIZUKI、Naoya HARA and Takeyoshi TANAKA、Calculating methods of Floor Illuminance by Emergency Lights in Fire Smoke taking into account of Smoke Adhesion、Proceedings of 26th session of the CIE、pp. D3-279-282、2007 年 7 月
- 5) Yuki AKIZUKI、Kohei YAMAO and Takeyoshi TANAKA、Experimental Study for Walking speed in Escape route considering Luminous Condition, Smoke Density and Evacuee's Visual Acuity、Proceedings of the 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology、pp.119-129、2007 年 9 月
- 6) Yuki AKIZUKI, Shino OKUDA, Michico IWATA and Takeyoshi TANAKA、Study on Quantifying Signs and Advertisements of Passageway in Public Buildings: International Comparison of Airports and Subway Stations、Proceedings of Interim Meeting of the International Colour Association、pp.150-153、2008 年 6 月
- 7) Yuki AKIZUKI and Naoya HARA、Study on the Downward Equivalent Reflectance of Smoke Layer、Proceedings of CIE-Midterm Meeting、pp.153-155、2009 年 5 月
- 8) Yuki AKIZUKI and Naoya HARA、Model Equation for Downward Equivalent Reflectance of Interface of Smoke Layer、Proceedings of 6th Lux Pacifica、pp.141 -144、2009 年 4 月
- 9) Yuki AKIZUKI and Naoya HARA、Study on the Downward Equivalent Reflectance of Smoke Layer、Proceedings of CIE Midterm Meeting、pp.153-155、2009 年 6 月
- 10) Yuki AKIZUKI、Naoya HARA and Takeyoshi TANAKA、Calculating Method of Evacuee's Behavior based on the Floor Illuminance in Fire Smoke Estimated by Two Layer Zone Model、Proceedings of 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire、pp.301-311、2009 年 7 月
- 11) Yuki AKIZUKI, Shino OKUDA, Michico IWATA and Takeyoshi TANAKA、Study on the Visual Environment Designs for Effective Evacuation Guidance - Measurement and evaluation of sign installation in escape routes、

Proceedings of the twelfth international conference Interflam2010、Volume 2、  
pp.1479-1485、2010 年 7 月

- 12) Yuki AKIZUKI、Naoya HARA and Takeyoshi TANAKA、Simplified Calculating  
Model of Floor Illuminance in Fire Smoke in Consideration of Smoke  
Adhesion、Proceedings of the 4<sup>th</sup> Lighting Conference of China, Japan and  
Korea、pp.108-109、2011 年 9 月

#### **【論文\_\_紀要・資料】**

- 1) Yuki AKIZUKI・Takeyoshi TANAKA・Michiko IWATA、Visibility of Signs  
Functioning as Urban Disaster Prevention under the Jurisdiction of  
Administration : Field Survey on Higashiyama, Kyoto、京都大学防災研究所年  
報、No.47 C、pp.315-323、2004 年 3 月
- 2) 秋月有紀・田中哮義、火災時の煙流動に伴う視野輝度分布の予測、照明学会誌、  
第 90 巻、4 号、pp.209-214、2006 年 4 月

#### **【論文\_\_国内口頭発表】**

- 1) 秋月有紀・田中哮義・岩田三千子、災害時の非難誘導に関する行政管轄下の標識  
の視認性 京都市東山区を対象とした実態調査、平成 15 年度京都大学防災研究  
所研究発表講演会概要集、2004 年 2 月
- 2) 秋月有紀・田中哮義、火災煙下での視覚刺激の物理量変化に関する研究 一周囲光  
がない環境下での、松浦の光透過近似式の検証一、照明学会全国大会講演論文集、  
pp.241-242、2004 年 8 月
- 3) 秋月有紀・鈴木秀和・田中哮義・土橋常登、火災煙中の誘導標識の視認性予測に  
関する研究 その 1 煙の付着を考慮した光透過式、日本火災学会平成 17 年度研  
究発表会概要集、pp.580-583、2005 年 5 月
- 4) 鈴木秀和・秋月有紀・田中哮義、火災煙中の誘導標識の視認性予測に関する研究 そ  
の 2 二層ゾーンモデルを用いた避難者視野輝度の予測、日本火災学会平成 17 年  
度研究発表会概要集、pp.584-587、2005 年 5 月
- 5) 秋月有紀・鈴木秀和・田中哮義・土橋常登、火災煙下での視覚刺激の物理量変化  
に関する研究 その 2 一煙の付着を考慮した視野輝度分布の予測一、照明学会全  
国大会講演論文集、pp.111-112、2005 年 7 月

- 6) 秋月有紀・鈴木秀和・田中哮義・土橋常登, 火災煙中の避難に対する視環境計画に関する研究 その1 火災時の煙の付着を考慮した視野輝度予測式, 日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2, pp.293-294、2005 年 9 月
- 7) 鈴木秀和・秋月有紀・田中哮義, 火災煙中の避難に対する視環境計画に関する研究 その2 二層ゾーンモデルを用いた火災室の視野輝度変化の予測, 日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2, pp.295-296、2005 年 9 月
- 8) 秋月有紀・田中哮義・鈴木秀和, 火災煙流動に伴う視野輝度分布の予測, 電気関係四部学会関西支部連合大会, G289、2005 年 11 月
- 9) 金井良智・田中哮義・秋月有紀・山田茂・角谷三夫, 建物内煙流動予測計算の効率化のための GUI プログラム開発 建物内煙流動予測における GUI 利用に関する研究 (その1), 日本火災学会平成 18 年度研究発表会概要集, pp.540-543、2006 年 5 月
- 10) 秋月有紀・金井良智・田中哮義・原直也・野口太郎, 画像処理による避難経路の視環境の表現 建物内煙流動予測における GUI 利用に関する研究 (その2), 日本火災学会平成 18 年度研究発表会概要集, pp.544-547、2006 年 5 月
- 11) 金井良智・田中哮義・秋月有紀・山田茂・角谷三夫, 建物空間内煙流動 GUI プログラムの開発 避難安全検証の GUI 利用に関する研究 (その1), 日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2, pp.191-192、2006 年 9 月
- 12) 秋月有紀・金井良智・田中哮義・原直也・野口太郎, 火災時の避難経路の視環境の表現 避難安全検証の GUI 利用に関する研究 (その2), 日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2, pp.193-194、2006 年 9 月
- 13) 秋月有紀・山尾耕平・田中哮義, 歩行空間の光環境と歩行速度及び歩行者視力の関係、火災環境下での視認性と避難歩行速度に関する研究 (その1)、日本火災学会平成 19 年度研究発表会概要集、pp.28-29、2007 年 5 月
- 14) 山尾耕平・秋月有紀・田中哮義, 歩行空間の光環境と歩行後評価、歩行者視力の関係、火災環境下での視認性と避難歩行速度に関する研究 (その2)、日本火災学会平成 19 年度研究発表会概要集、pp.30-31、2007 年 5 月
- 15) 水野雅之・円谷信一・菅野晃一・秋月有紀・田中哮義・森田昌宏・菅原進一・松村保雄・塚原孝夫・奥田義範, ポテンシャル法に基づく階段室避難シミュレーションの開発ーその1 被験者実験による避難者行動モデルの定式化ー、日本火災学会平成 19 年度研究発表会概要集、pp.22-23、2007 年 5 月
- 16) 円谷信一・水野雅之・菅野晃一・秋月有紀・田中哮義・森田昌宏・菅原進一・松村保雄・塚原孝夫・奥田義範, ポテンシャル法に基づく階段室避難シミュレーションの開発ーその2 階段室避難シミュレーションの開発ー、日本火災学会平成 19 年度研究発表会概要集、pp.24-25、2007 年 5 月
- 17) 菅野晃一・水野雅之・円谷信一・秋月有紀・田中哮義・森田昌宏・菅原進一・松村保雄・塚原孝夫・奥田義範, ポテンシャル法に基づく階段室避難シミュレーシ

ョンの開発ーその3 消防行政における避難安全指導への活用を目指した階段室避難シミュレーションの整備ー、日本火災学会平成 19 年度研究発表会概要集、pp.26-27、2007 年 5 月

- 18) 山尾耕平・秋月有紀・田中哮義、火災環境下での視認性と避難者行動及び心理状態に関する研究、歩行者の視野環境と歩行速度及び歩行後主観評価の関係、日本建築学会近畿支部研究報告集環境系、No.47、pp.281-284、2007 年 6 月
- 19) 秋月有紀・山尾耕平・田中哮義、様々な光環境下での視認性と歩行速度に関する研究、照明学会全国大会講演論文集、pp.91-92、2007 年 8 月
- 20) 秋月有紀・山尾耕平・田中哮義、災害時避難経路の視認性と避難歩行速度に関する実験的研究、その 1 様々な光環境下での歩行速度の予測、日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2、pp.279-280、2007 年 8 月
- 21) 山尾耕平・秋月有紀・田中哮義、災害時避難経路の視認性と避難歩行速度に関する実験的研究、その 2 避難者の心理状態の予測、日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2、pp.281-282、2007 年 8 月
- 22) 水野雅之・円谷信一・秋月有紀・田中哮義・森田昌宏・菅原進一、被験者実験による階段降下歩行者モデルの定式化 ポテンシャル法に基づく階段避難シミュレーションの開発（その 1）、日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2、pp.283-284、2007 年 8 月
- 23) 円谷信一・水野雅之・秋月有紀・田中哮義・森田昌宏・菅原進一、階段室避難シミュレーションの開発 ポテンシャル法に基づく階段避難シミュレーションの開発（その 2）、日本建築学会全国大会学術講演梗概集 A-2、pp.285-286、2007 年 8 月
- 24) 秋月有紀、いのちを守るあかりとサイン、第 5 回趣都ミニフォーラムあかりトーク 2007、2007 年 10 月
- 25) 秋月有紀、地方自治体の夜間避難対策の現状 高知・徳島・和歌山・静岡の事例、照明学会公開研究会 広域停電時の避難誘導ーあなたの街は大丈夫?!、2008 年 3 月
- 26) 秋月有紀・田中哮義・山尾耕平、視認性に基づく避難行動の予測、日本建築学会北陸支部研究報告集、pp.177-180、2008 年 7 月
- 27) 秋月有紀・岩田三千子・奥田紫乃・唐沢宜典・塚田敏美・土井正・松本泰幸・森下昌治、防災対策推進地域にある地方自治体の夜間対策の現状 高知・徳島・和歌山・静岡の事例、照明学会全国大会講演論文集、pp.117-118、2008 年 8 月
- 28) 秋月有紀・原直也、煙層下の床面照度算出式の構築に関する研究その 1 光学的濃度の縮率の取り扱い、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1、pp.459-460、2010 年 9 月
- 29) 秋月有紀、特殊環境下の視環境シミュレーション-建築火災時の避難の事例、日本建築学会公開研究会 光環境シミュレーションの可能性、2011 年 3 月

## 【研究助成】

- 1) 文部科学省科学研究費 若手研究 (A) 課題番号 17681020「大規模災害時に有効な避難誘導計画における都市機能整備に関する研究」研究代表者 (2005～2007 年)
- 2) 京都大学防災研究所 一般共同研究助成 17G-09「火災煙下での視認性減衰を考慮した避難路整備手法の開発」研究代表者 (2005 年)
- 3) 京都大学防災研究所 一般共同研究助成 18G-06「屋外防災照明の必要諸要件に関する検討」研究分担者 (2006 年)
- 4) 富山大学学長裁量経費 「火災時の避難経路視環境予測シミュレーションの開発」研究代表者 (2007 年)

## 謝辞

本研究は 2003 年 4 月から京都大学防災研究所 田中哮義教授の元で、COE 研究員として着手したことに始まります。それまで火災安全工学の分野に関わってこなかった私に対して、ご多忙にも関わらず基礎から実務での応用まで終始懇切なるご指導を賜りました。また研究者としての姿勢や国際感覚、教育者としての研究指導方法など、本当に多くのことを授けてくださいました。心より感謝申し上げますとともに、今後とも日々精進して参りたいと存じます。

本論文の審査にあたっては、京都大学工学研究科 鉾井修一教授、同 上谷芳昭准教授より有益なご助言を頂き、今後の研究の方向性についても貴重なご示唆を頂きました。深く感謝申し上げます。

本論文では、共同研究の形で多くの先生方にご指導とご支援を賜りました。特に第一部では、摂南大学理工学部 岩田三千子教授と同志社女子大学生活科学部 奥田紫乃准教授に、また第二部では関西大学環境都市工学部 原直也准教授と故野口太郎教授に、数々の貴重なご助言とご示唆を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また第 7 章の床面照度簡易計算モデルの構築については、田中哮義先生・原直也先生と共に京都大学工学研究科 原田和典教授からも多大なるご指導ご鞭撻を頂きました。ここに深く感謝申し上げますと共に、現在、先生方と共同研究開発を行っております大規模建築火災の避難行動プログラムへ本モデルを供するために、今後も一層努力して参りたいと存じます。

さらに卒業研究として本研究に携わり、研究の遂行にあたり多大なご助力を頂きました、当時京都大学工学部建築学科の鈴木秀和氏、金井良智氏、山尾耕平氏、関西大学工学部建築学科の斎藤匡宏氏、鈴木駿氏、同志社女子大学生活科学部の加藤亜周氏、広島国際大学社会環境科学部の織田丈史氏、新田有理氏に対して、深く感謝申し上げます。

最後に、常に私を励まし支えてくれました家族に、感謝の意を込めて本論文を捧げます。

2012 年 1 月  
秋月 有紀